

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-----0-----

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI TIZI OUZOU

-----0-----

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

-----0-----



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue d'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en

Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

**ETUDE DES GRANDS INCIDENTS SUR
LE RESEAU ELECTRIQUE**

Proposé et dirigé par :

N.OUERK.

Réalisé par :

Mr : Madani Farid.

Mr : Stiti Azeddine.

Promotion : 2008-2009

Remerciements

Merci à Dieu de nous avoir donné la force, la foi et le courage afin de mener ce travail jusqu'à terme.

Nous remercions notre promotrice N.OUERK, pour sa disponibilité, son soutien et ses orientations pour l'accomplissement de ce présent travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou, pour les efforts qu'ils fournissent pour promouvoir le niveau de formation des étudiants.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus notamment dans les moments difficiles.

Nous remercions les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à remercier fortement nos familles respectives, particulièrement nos parents, nos frères et sœurs pour leurs soutiens permanents.

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

- ✓ *La mémoire de mes grands parents, que leurs âmes reposent en paix*
- ✓ *Toute ma famille ; Mes chers parents, mes frères et sœurs, mes tantes, oncles et cousins*
- ✓ *Tous mes amis*
- ✓ *Toute la promotion 2008-2009*

Farid

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

- ✓ la mémoire de Riadh et Arezki, ainsi qu'à celle de mes deux grands pères Ammar et Arezki, que leurs âmes reposent en paix*
- ✓ Toute ma famille ; Mes parents, mes frères Mohammed Rédha et Amine, mes tantes, oncles et cousins*
- ✓ Tous mes amis à commencer par Samir, Lyes, Rabia. Et une dédicace particulière à Lynda*
- ✓ Toute la promotion 2008-2009.*

Azeddine

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE.I LE SYSTEME ELECTRIQUE	
I.1 Définition d'un réseau électrique.....	3
I.2 Principaux éléments d'un réseau électrique	3
I.2.1 Les unités de production.....	3
I.2.1.1 L'alternateur	4
I.2.1.2 Les auxiliaires.....	4
I.2.2 Les liaisons	4
I.2.2.1 Les lignes	4
I.2.2.2 Les postes de transformation.....	5
I.2.2.2.a Le transformateur.....	5
I.2.2.2.b Types de postes de transformation.....	5
I.2.2.3 Types de réseaux électriques	6
I.2.2.3.a Le réseau THT de transport et d'interconnexion.....	6
I.2.2.3.b Le réseau HT de répartition régionale.....	6
I.2.2.3.c Le réseau MT et BT de distribution	6
I.2.3 Les dispositifs de réglage de la tension et de la compensation de l'énergie réactive.....	6
I.2.3.1 Les groupes thermiques et hydrauliques	7
I.2.3.2 Les batteries de condensateurs	7
I.2.3.2.a Les condensateurs shunt.....	7
I.2.3.2.b Les condensateurs série.....	7
I.2.3.3 Les inductances	7
I.2.3.4 Les compensateurs synchrones	8
I.2.3.5 Les compensateurs statiques (SVC)	8
I.2.3.6 Les régulateurs en charge des transformateurs (OLTC).....	8
I.2.4 Les dispositifs de contrôle de la puissance active et de réglage de fréquence.....	8
I.2.4.1 Les régulateurs de vitesse des groupes de production (AGC)	8
I.2.4.2 Les contrôleurs universels de puissance (UPFC)	9
I.2.4.3 Les régulateurs de puissance interphase (RPI).....	9
I.2.4.4 Les condensateurs série et shunt.....	9
I.2.4.5 Les transformateurs déphaseurs.....	9
I.2.5 Les charges.....	9
I.2.5.1 Les types de charges.....	10
I.2.5.1.a Les charges statiques.....	10
I.2.5.1.b Les charges tournantes.....	10
I.2.5.2 Les catégories des charges.....	10
I.2.5.2.a Les charges de première catégorie.....	10
I.2.5.2.b Les charges de seconde catégorie.....	10
I.2.5.2.c Les charges de troisième catégorie.....	10
I.3 Stabilité d'un réseau électrique.....	10
I.3.1 Stabilité en fréquence.....	11
I.3.2 Stabilité en tension.....	11
CHAPITRE.II LES GRANDS INCIDENTS	
II.1 Les perturbations dans le réseau.....	12
II.1.1 Définition d'une perturbation.....	12
II.1.2 Les catégories de perturbations dans le réseau.....	12
II.1.2.1 Les variations de la consommation.....	12
II.1.2.2 Les perturbations climatiques importantes.....	12
II.1.2.3 Les défaillances des protections, d'automates, et des régulations.....	13
II.1.2.4 Les défaillances humaines dans la maintenance et les circonstances particulières d'exploitation.....	13
II.2 Phénomènes engendrés par les perturbations.....	14

II.2.1	Les pertes d'éléments du réseau.....	14
II.2.2	Les grandes oscillations.....	14
II.2.3	Les court-circuits	14
II.2.4	Les déséquilibres entre les couples électrique et mécanique de la turbine.....	14
II.2.5	Les chutes de tension sur le réseau.....	15
II.2.6	Les surtensions.....	15
II.2.7	Les creux de tension.....	15
II.2.8	Les fluctuations de la fréquence.....	15
II.3	Les grands incidents dans le réseau.....	15
II.3.1	Définition d'un grand incident.....	15
II.3.2	Les quatre grands incidents dans le réseau	15
II.3.2.1	L'écroulement de la tension.....	16
II.3.2.1.a	Phénomène de l'écroulement de tension.....	16
II.3.2.1.b	Principales causes.....	16
II.3.2.2	La perte de synchronisme.....	16
II.3.2.2.a	Phénomène la perte de synchronisme	16
II.3.2.2.b	Principales causes.....	17
II.3.2.3	Les surcharges en cascades.....	17
II.3.2.3.a	Phénomène des surcharges en cascade.....	17
II.3.2.3.b	Principales causes.....	17
II.3.2.4	L'écroulement de fréquence.....	17
II.3.2.4.a	Phénomène de l'écroulement de fréquence.....	17
II.3.2.4.b	Principales causes.....	18
II.4	Le plan de défense contre ces incidents.....	18
II.4.1	Les parades préventives.....	18
II.4.1.1	Les réglages de la tension et de la fréquence.....	18
II.4.1.1.a	Réglage de la tension.....	19
II.4.1.1.b	Réglage de la fréquence.....	19
II.4.2	Les parades curatives.....	20
II.4.2.1	Les parades curatives par opérateurs.....	20
II.4.2.2	Les parades curatives automatiques.....	21
II.5	Exemples de grandes pannes (incidents majeurs) dans le monde.....	21

CHAPITRE.III MISE EN EVIDENCE DES PHENOMENES TRAITES

III.1	Equations électriques.....	23
III.1.1	Evaluation de la chute de tension sur une ligne de transport.....	23
III.1.2	Puissance transmissible en fonction de l'angle interne.....	25
III.1.3	Equation mécanique.....	27
III.1.4	Processus de la stabilité en tension.....	27
III.1.4.1	Expression du courant circulant à travers la charge.....	28
III.1.4.2	Expression de la tension réceptrice.....	28
III.1.4.3	Expression de la puissance active délivrée à la charge.....	28
III.1.4.4	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge.....	29
III.1.4.5	Expression de la puissance active maximale.....	29
III.1.4.6	Expression de la puissance réactive maximale.....	30
III.1.4.7	Expression du courant critique.....	30
III.1.4.8	Expression de la tension critique.....	30
III.1.5	Phénomène de la rupture de synchronisme.....	31
III.1.5.1	Ligne inductive et charge impédante.....	31
III.1.5.1.a	Expression du courant circulant à travers la charge.....	32
III.1.5.1.b	Expression de la tension réceptrice.....	32
III.1.5.1.c	Expression de la puissance active transitée à la charge.....	32
III.1.5.1.d	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge.....	33
III.1.5.1.e	Expression de la puissance active maximale.....	33
III.1.5.1.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	33
III.1.5.1.g	Expression du courant critique.....	33

III.1.5.1.h	Expression de la tension critique.....	34
III.1.5.2	Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur.....	34
III.1.5.2.a	Expression du courant circulant à travers la charge.....	34
III.1.5.2.b	Expression de la tension réceptrice.....	35
III.1.5.2.c	Expression de la puissance active transitée à la charge.....	35
III.1.5.2.d	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge.....	35
III.1.5.2.e	Expression de la puissance active maximale.....	36
III.1.5.2.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	36
III.1.5.2.g	Expression du courant critique.....	36
III.1.5.2.h	Expression de la tension critique.....	36
III.1.5.3	Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la réactance du transformateur.....	37
III.1.5.3.a	Expression du courant circulant à travers la charge.....	37
III.1.5.3.b	Expression de la tension réceptrice.....	37
III.1.5.3.c	Expression de la puissance active absorbée par la charge.....	38
III.1.5.3.d	Expression de la puissance réactive absorbée par la charge.....	38
III.1.5.3.e	Expression de la puissance active maximale.....	39
III.1.5.3.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	39
III.1.5.3.g	Expression du courant critique.....	39
III.1.5.3.h	Expression de la tension critique.....	39
III.1.5.4	Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la compensation série locale.....	39
III.1.5.4.a	Expression du courant circulant à travers la charge.....	40
III.1.5.4.b	Expression de la tension réceptrice.....	40
III.1.5.4.c	Expression de la puissance active absorbée par la charge.....	41
III.1.5.4.d	Expression de la puissance réactive absorbée par la charge.....	41
III.1.5.4.e	Expression de la puissance active maximale.....	42
III.1.5.4.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	42
III.1.5.4.g	Expression du courant critique.....	42
III.1.5.4.h	Expression de la tension critique.....	42
III.1.5.5	Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur avec la compensation série locale et globale.....	42
III.1.5.5.a	Expression du courant circulant à travers la charge.....	43
III.1.5.5.b	Expression de la tension réceptrice.....	43
III.1.5.5.c	Expression de la puissance active absorbée par la charge.....	44
III.1.5.5.d	Expression de la puissance réactive absorbée par la charge.....	44
III.1.5.5.e	Expression de la puissance active maximale.....	45
III.1.5.5.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	45
III.1.5.5.g	Expression du courant critique.....	45
III.1.5.5.h	Expression de la tension critique.....	45
III.1.6	Phénomène des surcharges en cascade.....	46
III.1.6.1	Première phase (fonctionnement avec trois lignes de transmission).....	46
III.1.6.1.a	Expression des courants transités à la charge.....	47
III.1.6.1.b	Expression de la tension réceptrice.....	48
III.1.6.1.c	Expression des puissances actives transitées à la charge.....	48
III.1.6.1.d	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge.....	49
III.1.6.1.e	Expression de la puissance active maximale.....	50
III.1.6.1.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	50
III.1.6.1.g	Expression du courant critique.....	50
III.1.6.1.h	Expression de la tension critique.....	51
III.1.6.2	Seconde phase (perte de la ligne de transmission (3)).....	51
III.1.6.2.a	Expression des courants transités à la charge.....	52
III.1.6.2.b	Expression de la tension réceptrice.....	52
III.1.6.2.c	Expression des puissances actives transitées à la charge.....	53

III.1.6.2.d	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge	53
III.1.6.2.e	Expression de la puissance active maximale.....	54
III.1.6.2.f	Expression de la puissance réactive maximale	54
III.1.6.2.g	Expression du courant critique.....	54
III.1.6.2.h	Expression de la tension critique.....	55
III.1.6.3	Troisième phase (perte des lignes de transmission (2) et (3)).....	55
III.1.6.3.a	Expression des courants transités à la charge.....	55
III.1.6.3.b	Expression de la tension réceptrice.....	56
III.1.6.3.c	Expression des puissances actives transitées à la charge.....	56
III.1.6.3.d	Expression de la puissance réactive délivrée à la charge	57
III.1.6.3.e	Expression de la puissance active maximale	58
III.1.6.3.f	Expression de la puissance réactive maximale.....	58
III.1.6.3.g	Expression du courant critique.....	58
III.1.6.3.h	Expression de la tension critique.....	58
III.2	Simulation numérique.....	59
III.2.1	Processus de la stabilité en tension.....	59
III.2.1.1	Résultats et interprétations.....	60
III.2.1.2	Conclusion.....	72
III.2.2	Phénomène de la rupture de synchronisme.....	74
III.2.2.1	Résultats et interprétations.....	75
III.2.2.2	Conclusion.....	82
III.2.3	Phénomène des surcharges en cascades.....	83
III.2.3.1	Résultats et interprétations.....	84
III.2.3.2	Conclusion.....	97
CONCLUSION GENERALE.....		98

ANNEXES

ANNEXE (I) DEVELOPPEMENT DES EQUATIONS

I.1	Cas d'une ligne et charge impédantes
I.1.1	Evaluation du courant circulant à travers la charge
I.1.2	Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge
I.1.3	Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
I.1.4	Expression du courant critique
I.1.5	Expression de la tension critique
I.2	Cas d'une ligne inductive et charge impédante
I.2.1	Evaluation du courant circulant à travers la charge
I.2.2	Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge
I.2.3	Expression de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
I.2.4	Expression du courant critique
I.2.5	Expression de la tension critique
I.3	Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur.
I.3.1	Evaluation du courant circulant à travers la charge
I.3.2	Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge
I.3.3	Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
I.3.4	Expression du courant critique
I.3.5	Expression de la tension critique
I.4	Cas d'une ligne inductive et charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la réactance d'un transformateur.
I.4.1	Evaluation du courant circulant à travers la charge
I.4.2	Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge
I.4.3	Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
I.4.4	Expression du courant critique

- I.4.5 Expression de la tension critique
- I.5 Cas de la compensation série locale
- I.5.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge
- I.5.2 Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge
- I.5.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
- I.5.4 Expression du courant critique
- I.5.5 Expression de la tension critique
- I.6 Cas de la compensation série globale
- I.6.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge
- I.6.2 Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge
- I.6.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge
- I.6.4 Expression du courant critique
- I.6.5 Expression de la tension critique

ANNEXE (II) ORGANIGRAMMES DES PROGRAMMES INFORMATIQUES

- II.1 Organigramme du programme informatique **No 1**
Cas d'une ligne et d'une charge impédante.
- II.2 Organigrammes des programmes informatiques établis pour la mise e évidence de la
perte de synchronisme
- II.2.1 Organigramme du programme informatique **No 2**
Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante.
- II.2.2 Organigramme du programme informatique **No 3**
Cas d'une ligne inductive, et d'une charge impédante en introduisant la réactance
synchrone de l'alternateur.
- II.2.3 Organigramme du programme informatique **No 4**
Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction des réactances
de l'alternateur et du transformateur.
- II.2.4 Organigramme du programme informatique **No 5**
Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction de la
compensation série locale (**Xc1**).
- II.2.5 Organigramme du programme informatique **No 6**.
Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction de la
compensation série globale et locale (**Xc1+Xc2**).
- II.3 Organigramme du programme informatique **No 7**
Etude du phénomène des surcharges en cascade.

ANNEXE (III) : VALEURS NUMERIQUES DES GRANDEURS UTILISEES

Nomenclature

THT:	Très Haute Tension.
HT:	Haute Tension.
MT:	Moyenne Tension.
BT:	Basse Tension.
a:	Rapport de transformation du transformateur.
V1:	Tension aux bornes de l'enroulement primaire du transformateur (V).
V2:	Tension aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur (V).
I1:	Courant circulant au niveau de l'enroulement primaire du transformateur (A).
I2:	Courant circulant au niveau de l'enroulement secondaire du transformateur (A).
N1:	Nombre de spires de l'enroulement primaire du transformateur.
N2:	Nombre de spires de l'enroulement secondaire du transformateur.
Pc:	Puissance active transmissible à la charge (W).
Qc:	Puissance réactive consommée par la charge (VAr).
Re:	Partie réelle.
Im:	Partie imaginaire.
t:	Temps (s)
V:	Tension réceptrice (V).
I:	Courant absorbé par la charge (A).
I*:	Conjugué du courant I (A).
SVC:	Static VAr Condenser.
OLTC:	On Load Tap Changers.
AGC:	Automatic Governor Controllers.
UPFC:	Unified Power Flow Controllers.
RPI:	Régulateur de Puissance Interphase.
FCT :	Fonctionnement.
E:	Tension émettrice (V).
Vc:	Tension réceptrice (V).
Vccrit:	Tension réceptrice critique (V).
R_L:	Résistance de la ligne de transmission (Ω).
R_{L1}:	Résistance de la ligne de transmission (1) (Ω).
R_{L2}:	Résistance de la ligne de transmission (2) (Ω).
R_{L3}:	Résistance de la ligne de transmission (3) (Ω).
R_C:	Résistance de la charge (Ω).
X_L:	Réactance de la ligne de transport (Ω).
X_S:	Réactance synchrone de l'alternateur (Ω).
X_{Tr}:	Réactance inductive du transformateur (Ω).
X_{L1}:	Réactance inductive de la ligne de transmission (1) (Ω).
X_{L2}:	Réactance inductive de la ligne de transmission (2) (Ω).
X_{L3}:	Réactance inductive de la ligne de transmission (3) (Ω).
X_{C1}:	Réactance capacitive du condensateur (1) (compensation locale) (Ω).
X_{C2}:	Réactance capacitive du condensateur (2) (compensation globale) (Ω).
Z_L:	Impédance de la ligne de transmission (Ω).
Z_C:	Impédance de la charge (Ω).
Z_{L=eq}:	Impédance équivalente du réseau de transmission (Ω).
Z_{L1}:	Impédance de la ligne de transmission (1) (Ω).
Z_{L2}:	Impédance de la ligne de transmission (2) (Ω).

Z_{L3} :	Impédance de la ligne de transmission (3) (Ω).
I_c :	Courant circulant à travers la charge (A).
I_{c1} :	Courant circulant à travers la ligne d'impédance Z_{L1} (A).
I_{c2} :	Courant circulant à travers la ligne d'impédance Z_{L2} (A).
I_{c3} :	Courant circulant à travers la ligne d'impédance Z_{L3} (A).
I_{crit} :	Courant critique circulant à travers la charge (A).
p :	Puissance active délivrée à la charge (W)
Pc :	Puissance active consommée par la charge (W)
Pcmax :	Puissance active maximale délivrée à la charge (W)
Pmax :	Puissance active maximale délivrée à la charge (W)
P1 :	Puissance active délivrée à la charge via la ligne (1) (W).
P2 :	Puissance active délivrée à la charge via la ligne (2) (W).
P3 :	Puissance active délivrée à la charge via la ligne (3) (W).
Qc :	Puissance réactive délivrée à la charge (VAr).
Qcmax :	Puissance réactive maximale délivrée à la charge (VAr).
Qmax :	Puissance réactive maximale délivrée à la charge (VAr).
Fp :	Facteur de puissance de la charge.
ΔV :	Chute de tension (V).
θ :	Déphasage de l'impédance de la ligne (rad).
φ :	Déphasage entre la tension d'alimentation et le courant de ligne (rad).
δ :	Déphasage angulaire entre la tension émettrice et la tension réceptrice (angle interne) (rad).
Ava :	Avance de phase.
Ret :	Retard de phase.
K :	Facteur de variation de la charge (Z_L/Z_C).
f :	Fréquence du réseau.
Ω_r :	Vitesse angulaire rotorique (rads/s).
Ω_s :	Pulsation (rads/s).

$X_{T0} = X_L + X_S$:	Réactance totale du réseau de transmission (Ω)
$X_{T1} = X_L + X_S + X_{Tr}$:	Réactance totale du réseau de transmission (Ω)
$X_{T2} = X_L + X_S - X_{c1}$:	Réactance totale du réseau de transmission (Ω)
$X_{T3} = X_L + X_S - X_{c1} - X_{c2}$:	Réactance totale du réseau de transmission (Ω)
L-ind pure :	Ligne inductive pure.
L-ind+X_S :	Ligne inductive en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur.
L-ind+X_S+X_{Tr} :	Ligne inductive en introduisant la réactance synchrone, de l'alternateur et la réactance inductive du transformateur.
L-ind+X_S-X_{c1} :	Ligne inductive en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur, et la compensation locale.
L-ind+X_S-X_{c1}-X_{c2} :	Ligne inductive en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la compensation locale et globale.

INTRODUCTION GENERALE

Avec les évolutions des systèmes électriques et des besoins en énergie électrique, les réseaux électriques sont exploités de plus en plus près de leurs limites de sécurité et de stabilité. Les conditions d'exploitation des réseaux électriques deviennent de plus en plus complexes.

Dans cette situation des écroulements de réseaux (black-out) se produisent plus fréquemment à travers le monde. Ces incidents à grande échelle provoquent d'énormes pertes économiques mais aussi sociales, de part leurs étendues, leurs durées, et les désagréments causés. Les écroulements des grands réseaux sont donc devenus le souci majeur de tout exploitant d'un réseau d'énergie électrique.

Les phénomènes à l'origine de ces incidents à grande échelle sont au nombre de quatre, on cite l'écroulement de la tension, la perte de synchronisme, les surcharges en cascade et l'écroulement de fréquence. Compte tenu de la complexité des phénomènes impliqués, l'étude de ces derniers ne peut être réalisée que grâce à des outils parfaitement adaptés. Parmi ces outils, la simulation numérique, qui constitue l'un des meilleurs moyens pour l'assimilation et l'analyse de ces mécanismes tant craints, c'est pourquoi le sujet : l'étude théorique de ces phénomènes. Pour se faire, ce mémoire se compose des chapitres suivants :

- Le système électrique; ce premier chapitre fait l'objet de la notion du système électrique, de ses constituants, principal support pour la fourniture de l'énergie électrique, de la phase de production jusqu'à celle de son utilisation aux niveaux des utilisateurs.
- Les grands incidents; le deuxième chapitre décrit, les mécanismes à l'origine des écroulements des réseaux, ainsi que les divers phénomènes perturbateurs qui entachent le fonctionnement normal du système électrique, tout en exposant les parades préventives et curatives pour faire face à ces incidents.
- Mise en évidence des phénomènes étudiés; Ce troisième chapitre est composé principalement de deux parties, la première concerne la mise en équations du réseau simplifié.

La seconde partie intitulée Simulation numérique regroupe les résultats obtenus à partir d'un langage de programmation informatique «FORTRAN». Elle propose des figures et des interprétations, ainsi que des conclusions sur les trois phénomènes étudiés.

CHAPITRE I
LE SYSTEME ELECTRIQUE

Le système électrique constitue l'élément-clé pour la fourniture de l'énergie électrique dont les exploitants du réseau s'efforcent de garantir l'accès aux utilisateurs en respectant les critères de qualité et de continuité de service.

Les systèmes électriques sont d'énormes ensembles dont le fonctionnement est très complexe, cet ensemble peut être confronté à des incidents d'ampleur engendrant la mise hors tension de ce dernier, et les répercussions sont graves, mais avant d'entamer ce volet, il est utile d'assimiler ce qu'est un système d'énergie électrique, de connaître ses constituants et l'agencement entre ces derniers dans le but d'un fonctionnement normal et coordonné du réseau, c'est une phase où on donnera également les notions de stabilité du système électrique. Cette phase d'étude fera l'objectif de ce premier chapitre.

I.1 Définition

Un réseau électrique est un système constitué par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution, et à l'utilisation de l'énergie électrique [1].

I.2 Principaux éléments d'un réseau électrique

Un réseau électrique comporte une multitude d'éléments, parmi les quels on cite les principaux [1]-[5]:

- Les unités de production,
- Les liaisons,
- Les dispositifs de réglage de la tension et de la compensation de l'énergie réactive,
- Les dispositifs de réglage de la fréquence et de contrôle de la puissance active,
- Les charges.

I.2.1 Les unités de production

Les unités de production sont l'ensemble des groupes de production dans une centrale électrique. Un groupe de production d'énergie électrique est constitué d'une turbine, d'un alternateur, et d'un transformateur élévateur [1] [5].

L'organe principal d'une centrale est l'alternateur qui est couplé à sa turbine, et via le quel la centrale électrique produit de l'énergie électrique obtenue par conversion électromécanique d'une énergie primaire ayant différentes origines [3] [6] :

- Thermiques classiques (gaz, fuel, charbon, lignite...), et nucléaires (Uranium),

- Hydrauliques (eau),
- Renouvelables (solaire, éolienne, biomasse...etc.).

I.2.1.1 L'alternateur

L'alternateur est une machine synchrone triphasée constituée de deux parties [2]-[4] [6] :

- Une partie tournante appelée inducteur ou rotor,
- Une partie fixe appelée induit ou stator.

L'alternateur produit l'énergie électrique par conversion d'une énergie mécanique issue d'une énergie primaire. Il peut aussi fournir ou absorber de la puissance réactive en agissant sur le courant d'excitation de son rotor, c'est aussi le dispositif qui sert de réglage pour la tension et la fréquence.

I.2.1.2 Les auxiliaires

Dans une centrale électrique, il existe aussi des auxiliaires d'alternateur (la génératrice principale, et la génératrice pilote servant à l'excitation du groupe, et le moteur d'entraînement), et des auxiliaires de tranches (condenseurs, chaudières, pompes, ventilateurs, compresseurs, dépoussiéreurs ...etc.) [1] [6] [7].

I.2.2 Les liaisons

Les liaisons d'un réseau sont les lignes électriques, et les postes de transformation, ces composants jouent le rôle de lien entre la production et la consommation [1] [2] [6]-[10].

I.2.2.1 Les lignes

Les lignes électriques sont des conducteurs supportés par des pylônes ou poteaux à l'aide d'isolateurs suspendus ou rigides. Ces conducteurs relient deux sommets portés au même niveau de tension.

On distingue sur un réseau les quatre principaux types de lignes :

- Les lignes de transport à très haute tension (THT),
- Les lignes de transport à haute tension (HT),
- Les lignes de distribution à moyenne tension (MT),
- Les lignes de distribution à basse tension (BT).

I.2.2.2 Les postes de transformation

Les postes de transformation sont des installations composés d'éléments primaires, et d'éléments secondaires.

- Les éléments primaires sont : le (ou les) transformateur(s) électrique(s), les sectionneurs, les parafoudres, les jeux de barres, les disjoncteurs à haute tension et les batteries de condensateurs.
- Les éléments secondaires sont : les relais de protection, les équipements de contrôle, de téléconduite et de télécommunication, de comptage d'énergie et d'alimentation des auxiliaires.

I.2.2.2.a Le transformateur

Un transformateur est un appareil statique, qui permet de modifier la tension et le courant dans un réseau, c'est grâce à ce dispositif que l'énergie électrique est transportée sur de longues distances à partir des unités de production pour ensuite être répartie et distribuée sur les différentes charges connectées au réseau. La plupart des transformateurs sont munis de régleurs en charge.

Les transformateurs relient des nœuds du réseau portés à des niveaux de tension différents.

- **Le rapport de transformation**

$$a = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} = \frac{N1}{N2}$$

(Ce que l'on gagne en courant, on le perd en tension et vice versa).

I.2.2.2.b Types de postes de transformation

Selon les rôles dont ils sont assignés, on distingue les postes de transformation suivants:

- Les postes d'évacuation de centrale,
- Les postes d'interconnexion THT et HT,
- Les postes de transformation abaisseurs, et élévateurs,
- Les postes d'alimentation régionaux.

I.2.2.3 Types de réseaux électriques

Pour remplir avec efficacité leurs missions, les compagnies d'électricité disposent des réseaux suivants [1] [2] [3] [5] [6]:

I.2.2.3.a Le réseau THT de transport et d'interconnexion

Ce réseau est constitué de lignes et de postes de transformation issus des centrales de production. Il utilise des niveaux de tension supérieurs ou égaux à 220 KV. Ce réseau a une double fonction :

- La collecte de l'énergie électrique fournie par les centrales électriques afin de l'acheminer vers les grandes zones de consommation (fonction transport).
- Assurer des échanges d'énergies entre différentes régions et partenaires de pays frontaliers ou voisins (fonction interconnexion).

I.2.2.3.b Le réseau HT de répartition régionale

Ce réseau comporte des lignes et des postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport, et le réseau de distribution, ce réseau est notamment utilisé pour alimenter les grandes charges industrielles. Ce réseau est utilisé à des niveaux de tension supérieurs à 40 KV et inférieurs à 220 KV.

I.2.2.3.c Le réseau MT et BT de distribution

Ce réseau est constitué de lignes et de postes de transformation servant à la desserte de l'énergie électrique aux différents clients alimentés en MT et en BT, ce réseau se subdivise en deux sous réseaux:

- **Le réseau MT de distribution**, qui est utilisé pour desservir l'énergie électrique aux charges industrielles, agricoles,...etc.
- **Le réseau BT de distribution**, qui permet l'alimentation en énergie électrique des charges de catégorie publique (ménages, écoles, administrations,...etc.).

I.2.3 Les dispositifs de réglage de la tension et de la compensation de l'énergie réactive

La tension est l'un des principaux paramètres de qualité et de sûreté d'un réseau, et comme ce paramètre est étroitement lié à la puissance réactive, régler la tension revient à régler l'énergie réactive [Equation (III.2)], les dispositifs utilisés sont les suivants :

I.2.3.1 Les groupes thermiques et hydrauliques

Ces générateurs synchrones jouent un rôle essentiel dans le contrôle de la tension, grâce à la force électromotrice de leurs alternateurs ; ils fixent la tension, et la régulent aux moyens de leurs régulateurs de tension qui agissent sur le courant d'excitation. Ils peuvent absorber ou générer de la puissance réactive selon qu'ils soient sous excités ou surexcités. Cependant leurs performances en énergie réactive sont limitées par les courants maximums rotoriques ainsi que les courants maximums statoriques permis correspondants aux arrivées en butées des limites thermiques [2] [11].

I.2.3.2 Les batteries de condensateurs

Elles fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges et les lignes, on distingue :

I.2.3.2.a Les condensateurs shunt

Le principe de la compensation shunt (ou parallèle) consiste en des bancs de condensateurs placés en parallèle sur les lignes de transport, et en divers points du réseau ; ils sont installés près des charges pour améliorer le facteur de puissance et au niveau des réseaux de répartitions pour compenser les pertes réactives. Ces dispositifs sont appréciés pour leur flexibilité d'installation et d'exploitation [2] [12] [13].

I.2.3.2.b Les condensateurs série

La compensation série consiste à placer des condensateurs en série dans le circuit (réseau électrique), ce moyen est très efficace pour réduire les chutes de tension dans le réseau et sur les lignes. L'inconvénient de ce type d'équipements est leur coût assez élevé, en plus d'imposer des protections complexes [1] [2] [13] [14].

I.2.3.3 Les inductances

Les inductances sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie durant les heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les réseaux de câbles.

Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs THT et HT [15].

1.2.3.4 Les compensateurs synchrones

Un compensateur synchrone est une machine synchrone qui tourne à vide, et dont l'unique fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur le réseau, cela en agissant sur son courant d'excitation selon les besoins. L'avantage que présente ce genre de dispositif est que sa production réactive n'est pas influencée par la tension du réseau [1] [2] [15].

1.2.3.5 Les compensateurs statiques (SVC)

Comme leur nom l'indique, ces dispositifs ne contiennent aucun élément mobile, les modèles les plus courants sont constitués d'ensemble de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par des thyristors. Ils peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive selon les besoins du réseau, et contribuent ainsi à l'amélioration de la stabilité du système électrique [1] [2] [16].

1.2.3.6 Les régulateurs en charge des transformateurs (OLTC)

Installés sur les transformateurs, ces derniers agissent directement sur le rapport de transformation afin de rehausser, et maintenir un plan de tension constant par changement du nombre de spires de l'enroulement secondaire. Ces dispositifs compensent les chutes de tension importantes [2] [17].

1.2.4 Les dispositifs de contrôle de la puissance active et de réglage de fréquence

Comme la puissance active et la fréquence sont des grandeurs électriques étroitement liées, une modification de l'une de ces grandeurs engendre la modification de l'autre, on est donc appelé à contrôler ces deux paramètres, et cela par l'utilisation des dispositifs suivants [6] [8] [12] [13]:

1.2.4.1 Les régulateurs de vitesse des groupes de production (AGC)

Le régulateur de vitesse est un dispositif d'ajustement qui agit sur les organes d'admission de fluide (valve ou vanne) au niveau de la turbine d'un groupe de production, dans le but de rétablir suite à un déséquilibre la fréquence à sa valeur nominale (50Hz), en mesurant la différence entre la vitesse angulaire du rotor du générateur avec une valeur de référence. Le régulateur de vitesse constitue le réglage primaire de la fréquence [6] [18].

1.2.4.2 Les contrôleurs universels de puissance (UPFC)

Le contrôleur UPFC est un convertisseur extrêmement flexible qui permet de commander électroniquement les flux des grandes puissances transportées sur les lignes. Il peut imposer les valeurs et les directions des puissances active et réactive transportées selon les besoins [1] [6].

1.2.4.3 Les régulateurs de puissance interphase (RPI)

Ce sont des appareils modernes qui maintiennent des flux de puissance essentiellement constants entre deux régions électriques même lorsque l'angle de déphasage entre ces dernières fluctue, ils permettent en plus l'imposition des sens de transits des puissances actives, et l'amélioration du facteur de puissance [1] [6].

1.2.4.4 Les condensateurs série et shunt

Bien que leur principale fonction soit de compenser l'énergie réactive et d'assurer le réglage du plan de tension du réseau, les condensateurs série et shunt constituent aussi un moyen très efficace pour augmenter le facteur de puissance, et la puissance transportable sur les lignes de transport d'énergie électrique, cela en réduisant les réactances de ces mêmes lignes [1] [2] [12] [13].

1.2.4.5 Les transformateurs déphaseurs

Ces transformateurs spéciaux sont conçus pour imposer un sens de transit et d'écoulement des puissances actives sur le réseau électrique en modifiant le déphasage entre deux zones électriques données, sans pour autant modifier les valeurs de ces puissances actives transitées [1] [8].

1.2.5 Les charges

Les charges sont les récepteurs d'énergie électrique, elles constituent ce qui est communément appelé consommation, elles ont une partie active (transformée en travail mécanique, chaleur, lumière...etc.), et une partie réactive (induction des moteurs asynchrones...etc.), ces deux parties sont dépendantes de la tension et du temps [2] [8] [9] [19].

$$P_c = P_c(t, v) = \operatorname{Re}(V \cdot I^*)$$

$$Q_c = Q_c(t, v) = \operatorname{Im}(V \cdot I^*)$$

I.2.5.1 Les types de charges

On distingue entre charges statiques et charges tournantes:

I.2.5.1.a Les charges statiques

Elles transforment l'énergie électrique en lumière, en chaleur...etc.

I.2.5.1.b Les charges tournantes

Ces charges transforment l'énergie électrique en énergie mécanique.

I.2.5.2 Les catégories de charges

Selon l'ordre de priorité et la continuité d'alimentation en énergie électrique, on distingue trois catégories de charges:

I.2.5.2.a Les charges de première catégorie

Ce sont les organismes de santé (hôpitaux, cliniques, laboratoires médicaux et de recherche), certains systèmes de conditionnement d'air (métro...etc.), systèmes de signalisations routiers, balisages des aéroports, les auxiliaires de centrales...etc.

I.2.5.2.b Les charges de seconde catégorie

Ce sont les charges industrielles où toute interruption d'alimentation en énergie électrique conduit tout de même à des répercussions économiques.

I.2.5.2.c Les charges de troisième catégorie

Ce sont les ménages, les villages, la plupart des administrations, les écoles, en somme des charges que l'on déleste en premier lieu en cas de problèmes sur le réseau électrique...etc.

I.3 Stabilité d'un réseau

On distingue deux types de stabilité d'un réseau:

- La stabilité en tension,
- La stabilité en fréquence.

I.3.1 Stabilité en fréquence

La stabilité en fréquence se rapporte à l'équilibre entre la production et la consommation de puissance active, et au maintien du synchronisme entre les alternateurs de toutes les centrales d'un réseau [2] [19] [20].

I.3.2 Stabilité en tension

La stabilité en tension est l'aptitude d'un réseau d'énergie à maintenir la tension dans les plages requises au niveau de tous les nœuds du réseau, en conditions d'exploitation normales ou perturbées [2] [21] [22].

Pour assurer donc un fonctionnement normal d'un réseau, c'est-à-dire ; veiller à ce que la puissance totale fournie par l'ensemble des machines raccordées au réseau compense exactement la totalité des puissances demandées et les pertes dans le réseau. La gestion du réseau est assurée par un organisme centralisateur appelé dispatching national, au quel sont adjoints de dispatchings régionaux, il a pour rôle de contrôler les grandeurs électriques permettant la sûreté du réseau dans une situation idéale ou dans le cas contraire apporter des parades pour éviter la dégradation de service qui peut aller jusqu'à l'écroulement complet du réseau.

Malgré l'ensemble de toutes ces infrastructures, le rôle joué par chaque élément constituant le réseau électrique, et la présence de dispatchings, la sûreté du réseau est souvent menacée, à cause des différentes agressions auxquelles il est en permanence soumis, c'est pourquoi la prochaine étape, qui consistera à traiter les différentes formes d'agressions qui mettent en danger la stabilité et la sûreté du réseau.

CHAPITRE II
LES GRANDS INCIDENTS

Malgré l'existence d'une multitude d'infrastructures constituant le réseau, cela n'empêche pas que cet ensemble soit soumis à différents phénomènes électriques liés à des agressions qui peuvent dans certaines circonstances perturber le fonctionnement normal de ce système, et engendrer des coupures d'électricité, qui peuvent être très étendues et de durées importantes à cause de certains mécanismes de dégradation qu'on appelle « les grands incidents », et dont les conséquences sont souvent néfastes.

Cette partie est donc consacré à l'illustration de ces mécanismes de dégradation tant redoutés et aux phénomènes qui y-sont liés ainsi qu'à l'ensemble des solutions proposées pour faire face à ces mécanismes, enfin des exemples de grands incidents sont aussi mentionnés.

II.1 Les perturbations dans le réseau

II.1.1 Définition d'une perturbation

Une perturbation est un événement non planifié qui provoque un fonctionnement anormal du système électrique [23].

II.1.2 Catégories de perturbations dans le réseau

Les diverses perturbations auxquelles peut être confronté un réseau sont regroupées en quatre familles principales, on cite [4] [19] :

II.1.2.1 Les variations de la consommation

Ce sont les variations naturelles de charges, qui se traduisent par une augmentation ou une baisse naturelles de charges non prévues [2] [4] [6] [19] [24] [25]. On distingue :

- Des variations lentes,
- Des variations rapides.

II.1.2.2 Les perturbations climatiques importantes

Le réseau électrique peut être perturbé à cause des agressions climatiques (ou des phénomènes atmosphériques).

On peut citer :

- Les coups de foudre; qui sont des phénomènes naturels, apparaissant le plus souvent en cas d'orage. C'est l'une des principales origines de court-circuits dans les réseaux [6] [19] [24] [25],

- Les variations importantes de température ; occasionnant des vagues de chaleur ou de froid exceptionnelles et qui entraînent des pics anormaux de consommation d'énergie électrique, contraignant ainsi les ouvrages de production et de transport à fonctionner au-delà de leurs limites constructives, dans des conditions inhabituelles et de grande sévérité [4] [6] [26],
- Les tempêtes, et les tornades qui peuvent occasionner la perte d'un certain nombre d'ouvrages de transport ou de production d'énergie [4] [6],
- Le système peut aussi subir des agressions mécaniques ; la neige, la glace et le givre, dont l'accumulation sur les lignes de transport conjuguée à des vents violents cause un phénomène d'oscillations des lignes (lignes galopantes), ou pire entrainer la rupture des pylônes, cependant même si la cause est mécanique le résultat est toujours électrique (court-circuits) [1] [4] [6],

II.1.2.3 Les défaillances des protections, d'automates, et des régulations

Dans le cas d'éléments non autotestés, elles sont d'autant plus graves que l'on ne peut en général repérer les défaillances que lorsque ces systèmes sont sollicités, c'est-à-dire en régime d'incident (déclenchement inapproprié). L'implication de cette catégorie de perturbations a déjà été prouvée lors de grands incidents comme facteur « aggravant » contribuant à la propagation des incidents majeurs [4] [6] [23] [25].

II.1.2.4 Les défaillances humaines dans la maintenance et les circonstances particulières d'exploitation.

On peut citer [4] [6] [17] [19] [24]:

- Les fausses manœuvres dans la maintenance et l'exploitation du réseau qui peuvent causer les pertes d'ouvrages de transport ou de production,
- Les défauts d'isolation et le vieillissement de certains éléments du réseau, conjugués à des lacunes dans l'entretien peuvent engendrer des ruptures ou des défaillances locales causant par la suite des court-circuits,
- Les mauvaises prévisions des niveaux de consommation, ou carrément des prévisions erronées, conjuguées à des conditions climatiques imprévues très souvent...etc.

II.2 Phénomènes engendrés par les perturbations

II.2.1 Les pertes d'éléments du réseau

Les pertes d'éléments sont considérées comme l'événement le plus grave que peut subir un réseau, la gravité de la situation dépend principalement de la nature, de la taille et surtout du nombre d'éléments perdus [4] [24].

On cite à titre d'exemple :

- La perte d'une ligne de transport,
- La perte d'un groupe de production...etc.

II.2.2 Les grandes oscillations

Elles sont appelées oscillations interrégionales ou interzonales, ce sont des oscillations rotoriques qui se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière, à une fréquence allant de 0.15 à 0.30 Hz. Ce phénomène oscillatoire est considéré comme très dangereux, il se propage à grande échelle, et se termine très souvent par une perte de synchronisme définitif dans un réseau interconnecté [12] [24].

II.2.3 Les court-circuits

Un court-circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur une impédance nulle ou de faible valeur, c'est une mise à la terre accidentelle d'une ou de plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique, menant à un fonctionnement anormal du système et de ces équipements [18] [24].

II.2.4 Les déséquilibres entre les couples électrique et mécanique de la turbine

Ces déséquilibres proviennent et traduisent la rupture de l'équilibre entre la production et la consommation, ils peuvent avoir pour origine un incident sur le réseau tel que le déclenchement des protections d'une ligne de transport pour cause de défaut par exemple [18] [21] [24].

On distingue :

- Le cas où la production est supérieure à la consommation, ce qui entraîne une baisse de fréquence dans le réseau, causée par la décélération des générateurs du réseau.
- Le cas où la production est inférieure à la consommation. ce qui cause une hausse de la fréquence du réseau due à l'accélération des générateurs du réseau.

II.2.5 Les chutes de tension sur le réseau

Les chutes de tension sont des baisses de la tension en dessous de la valeur nominale, elles sont principalement causées par l'augmentation de l'appel de charge. Elles traduisent l'inaptitude du réseau et de ses dispositifs de compensation d'énergie réactive à combler un déficit en puissance réactive aux niveaux des zones consommatrices et sur les lignes de transport d'énergie électrique [27].

II.2.6 Les surtensions

Les surtensions sont des tensions appliquées sur les divers équipements ou composants d'un réseau et dont les valeurs de crête sortent de certaines limites d'exploitation prédéfinies [27].

II.2.7 Les creux de tension

Un creux de tension est une baisse significative et brutale de la tension en un point du réseau, à une valeur comprise entre 90% et 10% d'une tension de référence (tension nominale) s'ensuit un rétablissement de la tension après un court laps de temps pouvant aller jusqu'à une minute. Un creux de tension est dû principalement à des phénomènes menant à l'apparition de courants élevés dans un réseau [27].

II.2.8 Les fluctuations de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz +/- 1 % [24].

II.3 Les grands incidents dans le réseau

II.3.1 Définition d'un grand incident

Lorsqu'une région entière, voire un pays, est totalement privé d'électricité pendant plusieurs heures, les conséquences sur la vie sociale et économique sont telles que l'événement défraye la chronique et fait la une des journaux. Les électriciens parlent alors de «grand incident» [6].

II.3.2 Les quatre grands incidents dans le réseau

Que son origine soit constituée par des fluctuations de consommation, des perturbations climatiques, des pannes ou agressions extérieures, voire des erreurs humaines, et de défaillance des dispositifs de protection, la dégradation d'un système électrique autrement dit un incident de grande

ampleur se matérialise par une série de phénomènes qui se succèdent, s'associent ou se conjuguent jusqu'à provoquer une dislocation complète du réseau. Ces mécanismes sont :

- L'écroulement de tension,
- La rupture de synchronisme,
- Les surcharges en cascade,
- L'écroulement de fréquence.

Lorsque les grands incidents sont très complexes et se produisent sur des réseaux étendus, ces quatre phénomènes peuvent se succéder, se superposer ou s'associer ; ainsi, l'incident de décembre 1978 en France a commencé avec le phénomène des surcharges en cascade puis s'est accéléré et étendu avec le phénomène de rupture de synchronisme ; l'incident européen du 4 novembre 2006 a commencé avec le phénomène de surcharges en cascade et s'est poursuivi avec le phénomène d'écroulement de fréquence.

II.3.2.1 L'écroulement de la tension

II.3.2.1.a Phénomène de l'écroulement de la tension

L'écroulement de tension est le processus par lequel un dépassement des puissances maximales tolérées sur les lignes de transport, aboutit à une baisse graduelle de la tension dans un premier temps, puis rapide et d'une manière non maîtrisable dans une voire plusieurs zones consommatrices. L'incapacité des réglages de tension à maîtriser cette baisse, et à maintenir la tension au dessus d'une valeur critique conduit inévitablement à l'écroulement de tension [2] [16] [19] [22].

II.3.2.1.b Principales causes

- Manque local d'énergie réactive,
- Eloignement de la production par rapport à la consommation,
- Charge appelée trop importante,
- Tension trop basse à la production,

II.3.2.2 La perte de synchronisme

II.3.2.2.a Phénomène de la perte de synchronisme

La perte de synchronisme est le fait que les rotors des alternateurs d'un réseau ne tournent plus à la même vitesse, ce phénomène est un processus par lequel le couple synchronisant entre les

différents groupes de production du réseau vient à rompre, menant à des glissements importants des angles internes, autrement dit à des variations des écarts entre ses angles [4] [6] [21] [24] [25].

II.3.2.2.b Principales causes

- Les variations brusques de la charge,
- Les court-circuits,
- Les déclenchements d'ouvrages,
- Les grandes oscillations ...etc.

II.3.2.3 Les surcharges en cascade

II.3.2.3.a Phénomène des surcharges en cascade

Les surcharges en cascade est un phénomène résultant de reports de charges successifs sur plusieurs lignes de transport en parallèle, et ayant pour origine le déclenchement par protection de surcharge d'une ligne très fortement chargée suite au maintien d'intensités en courant trop élevées sur cette dernière, ce déclenchement initial entraîne ainsi le report de l'important transit énergétique assuré auparavant par l'ouvrage (ligne) déclenchée sur d'autres ouvrages qui à leur tour vont se retrouver confronter à de nouvelles surcharges très contraignantes par effet cumulatif [4] [6] [29].

Par la suite, et selon les circonstances de la situation, le maintien de nouvelles intensités de courant encore plus élevées que les intensités initiales supportées par les lignes induisent l'échauffement des conducteurs pouvant ainsi les endommager au point de provoquer leur allongement, ils se rapprochent du sol présentant ainsi des risques d'amorçages par réduction de la distance d'isolement, et créant des risques pour les vies humaines et les biens.

II.3.2.3.b Principales causes

- Le maintien d'intensités trop élevées en courants sur les lignes,
- Les pertes d'éléments du réseau (particulièrement le déclenchement de lignes de transport et des groupes de production),
- Les dysfonctionnements des protections, et des automatismes.

II.3.2.4 L'écroulement de fréquence

II.3.2.4.a Phénomène de l'écroulement de fréquence

Le phénomène de l'écroulement de fréquence est un processus à dynamique rapide traduisant une surcharge généralisée, et engendrant une chute de fréquence sur l'ensemble d'un réseau

(comme cette dernière est une grandeur globale), ce mécanisme résulte des déséquilibres trop importants entre la production et la consommation [4] [6] [29].

II.3.2.4.b Principales causes

- Les court-circuits,
- L'augmentation brusque de la consommation ou la baisse de production,
- Les pertes d'éléments.

Ces quatre grands incidents ont des conséquences vraiment néfastes sur le réseau cependant il existe des moyens qui permettent de les prévoir, de les éviter ou de limiter leurs dégâts quand ils surviennent.

II.4 Le plan de défense contre ces incidents

La défense des systèmes électriques contre les incidents majeurs a pour rôle d'éviter, de contrôler, et de contenir l'évolution des principaux phénomènes qui peuvent conduire aux effondrements de ces systèmes ; qu'ils soient partiels ou totaux [4] [30]. Il existe :

- Des parades préventives,
- Des parades curatives (ultimes).

II.4.1 Les parades préventives

L'objectif des actions préventives dans un réseau est de faire en sorte que les phénomènes tant redoutés à l'origine des blackouts ne s'amorcent pas, elles englobent un certain nombre d'actions et de coordinations entre les différents éléments du réseau, les actions préventives consistent donc en [4] [6] [19] [24] [30] :

- La bonne prévision de la consommation,
- Le bon dimensionnement des composants du réseau,
- Le maintien d'une réserve de puissance dans les centrales électriques,
- S'assurer du bon réglage des plans de tension, et de la fréquence dans le réseau électrique (réglages primaire, secondaire et tertiaire).

II.4.1.1 Les réglages de la tension et de la fréquence

Les contrôles de la tension et de la fréquence en fonctionnement normal s'effectuent par des successions de trois niveaux de commandes, on cite :

- Le réglage primaire,
- Le réglage secondaire,
- Le réglage tertiaire.

II.4.1.1.a Réglage de la tension

Le réglage de la tension permet de mobiliser les réserves réactives sur des zones très étendues d'un réseau, il est constitué de trois niveaux, on cite [2] [4] [6] [16] [19] [21]:

- **Le réglage primaire (RPT)**

Il a pour rôle de mobiliser les réserves réactives des groupes de production lors d'une perturbation, le réglage primaire est local et s'effectue grâce aux régulateurs primaires de la tension suite à l'observation des variations de tension aux stators des groupes, de sorte à maintenir cette tension égale à une valeur de consigne.

- **Le réglage secondaire (RST)**

Le réglage secondaire de tension mobilise les réserves réactives de l'ensemble des groupes, des dispositifs de compensation d'énergie réactive cités au chapitre (I), par zones appelées zones de réglage secondaires, et vise à maintenir la tension constante en des points pilotes du réseau (nœuds).

- **Le réglage tertiaire (RTT)**

Ce réglage est manuel et consiste en des actions commandées par les opérateurs des dispatchings afin de coordonner le plan de tension entre les zones du réglage secondaire, veiller à coordonner les réglages primaire et secondaire, c'est aussi ce réglage qui détermine les centrales qui doivent être démarrées lors de situations d'incidents, et les niveaux de puissance réactive qu'elles doivent fournir.

II.4.1.1.b Réglage de la fréquence

Le réglage de la fréquence se base sur l'utilisation des réserves d'énergies cinétique et tournantes des groupes de production, en effet ces dernières sont mobilisables en des intervalles de temps courts. On distingue [4] [6] [19] [21] [29]:

- **Le réglage primaire (RPF)**

Le réglage primaire de la fréquence sur un réseau comprenant un ensemble d'alternateurs interconnectés est effectué localement au niveau de chaque alternateur, et limite considérablement les variations de fréquence dues aux variations de charge (consommation), il est assuré par les régulateurs de vitesse de chaque alternateur. Ce réglage est conçu de telle sorte que l'effort consenti par chaque alternateur peut être adapté à sa puissance et à sa technologie, mais ne peut aboutir à un écart de fréquence nul. Ce réglage est entièrement automatique et instantané.

- **Le réglage secondaire (RSF)**

Le réglage secondaire a pour rôle de corriger les imperfections du réglage primaire. Il consiste à modifier les puissances de consignes des divers alternateurs régulés afin de réduire à la fois les écarts de puissances aux interconnexions (rééquilibrer les échanges d'énergies) et ramener la fréquence à sa valeur de référence (50 Hz). Ce réglage est entièrement automatique, et réagit en quelques minutes.

- **Le réglage tertiaire (RTF)**

Ce réglage est manuel contrairement aux réglages secondaire et primaire, il est assuré par les opérateurs des dispatchings et a pour rôle de :

- Déterminer les centrales qui doivent être démarrées, ou au contraire, arrêtées.
- Déterminer la structure (topologie) opérationnelle du réseau.

II.4.2 Les parades curatives (ultimes)

Malgré toutes les précautions prises, et sachant que le risque nul n'existe pas, l'exploitant du réseau doit aussi prévoir des mesures curatives pour essayer de gérer au mieux les grands incidents. L'ensemble de ces actions dites « curatives » sont des parades ultimes consistant à freiner, et à endiguer les mécanismes à l'origine de l'écroulement du réseau, ces ensembles d'actions sont adaptées selon la nature du phénomène, et surtout à sa dynamique. On distingue:

- Les parades curatives manuelles (par opérateur),
- Les parades curatives automatiques.

II.4.2.1 Les parades curatives par opérateurs

Ces parades consistent en des contre-mesures pour stopper des dégradations à dynamique lente du réseau typiquement l'écroulement de tension, et le phénomène des surcharges en cascade. ces moyens sont [4] [6] [24] [25] [30] [31] [32] :

- Le blocage des régleurs en charge THT/HT, HTB/HTA,
- La diminution de la consigne des régleurs en charge,
- L'enclenchement des dispositifs de compensation d'énergie réactive,
- L'utilisation des surcharges réactives sur les groupes,
- Le délestage (manuel) de charge.

II.4.2.2 Les parades curatives automatiques

Cela consiste à établir des contre-mesures contre des dégradations à dynamique rapide tels que les phénomènes de rupture de synchronisme et de l'écroulement de fréquence. Ces moyens sont [6] [24] [25] [30] [31] [32]:

- Le passage à la puissance maximale des groupes de production,
- Diminution de la consigne en tension des régleurs en charge,
- Le blocage des régleurs en charge THT/HT, HTB/HTA,
- Le délestage automatique en sous-fréquence,
- Le délestage automatique de charge en sous-tension,
- L'îlotage d'une zone sur critère de rupture de synchronisme.

II.5 Exemples de grandes pannes (incidents majeurs) dans le monde

On donne ci-après quelques exemples de grands incidents dans le monde par type de phénomène à l'origine de l'écroulement [29] [30]:

- **Phénomène d'écroulement de tension**
 - Russie le 25 Mai 2005,
 - Londres (Grande Bretagne) le 28 Août 2003,

- Algérie le 03 Février 2003,
 - Québec (Canada) en 1989,
 - Japon le 23 Septembre 1987,
 - France le 12 Janvier 1987, et en 1978.
- **Phénomène de rupture de synchronisme**
 - Ontario (Etats-Unis) en juin 1998,
 - Canada le 18 Avril 1988,
 - Normandie (France) le 28 Octobre 1981,
 - France en Décembre 1978.
- **Phénomène des surcharges en cascade**
 - Californie (Etats-Unis) en Janvier 2008,
 - Europe de l'ouest le 04 Novembre 2006,
 - Suisse- Italie le 28 Septembre 2003,
 - Nord Est des USA et Sud du Canada le 14 Août 2003.
- **Phénomène d'écroulement de fréquence**
 - Europe de l'ouest le 04 Novembre 2006,
 - France en 1976.

On a vu que les grands incidents sont des mécanismes d'une extrême gravité, et que quand ces derniers surviennent, ils affectent l'intégrité du réseau d'énergie, le menant ainsi vers une situation très critique d'écroulement généralisé, conséquence d'une mise hors tension à grande échelle.

C'est pour cela qu'on se propose d'étudier trois de ces quatre grands phénomènes traités et tant redoutés grâce à l'outil parfaitement adapté que constitue la simulation numérique, mais avant d'aborder cette phase, une mise en équation des grandeurs électriques préconisées pour cette étude est impérative, et c'est ce qui fera le sujet du prochain chapitre intitulé «Mise en évidence des phénomènes traités».

CHAPITRE III

MISE EN EVIDENCE DES PHENOMENES TRAITES

On va mettre en évidence dans une première étape le phénomène du processus de la stabilité en tension sur un réseau simplifié, et à partir de cette phase d'étude, on va illustrer le phénomène de la perte de synchronisme, puis on mettra en évidence le processus des surcharges en cascade.

Pour se faire, on considère une source de tension alternative constante alimentant une charge impédante, de module Z_C et de déphasage φ à travers une ligne de transport impédante de module Z_L et de déphasage θ .

Après la mise en équations du système considéré, on a obtenu l'expression du courant circulant à travers la charge traitée, l'expression de la tension à ses bornes et les expressions des puissances active et réactive consommées par la charge.

Pour mettre en évidence, les processus traités, il est préconisé d'observer l'évolution de ces paramètres en fonction de la variation de la charge.

Pour se faire, on va faire appel à la simulation numérique, en utilisant un langage de programmation informatique « **Fortran** ». Mais avant d'aborder cette partie, il est impératif d'établir l'expression de la chute de tension sur une ligne de transport et celle donnant la relation de la puissance active consommée par la charge en fonction de l'angle interne (δ).

III.1 Equations électriques

III.1.1 Evaluation de la chute de tension sur une ligne de transport

Pour évaluer la chute de tension sur une ligne de transport, on considère le circuit suivant :

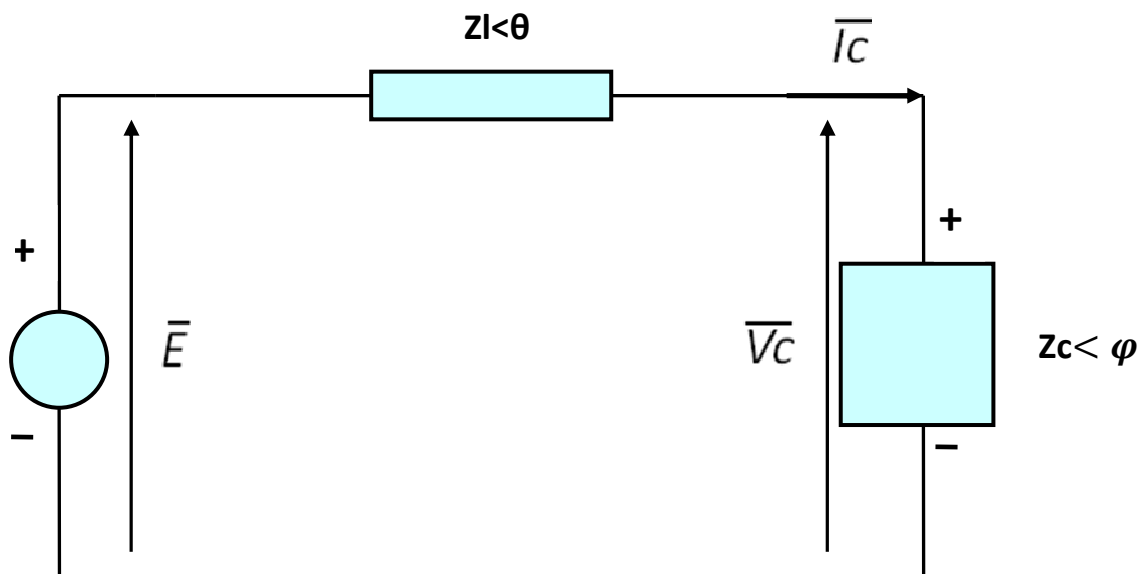


Fig.III.1 Schéma représentatif du modèle traité.

En traçant le diagramme vectoriel correspondant, on obtient :

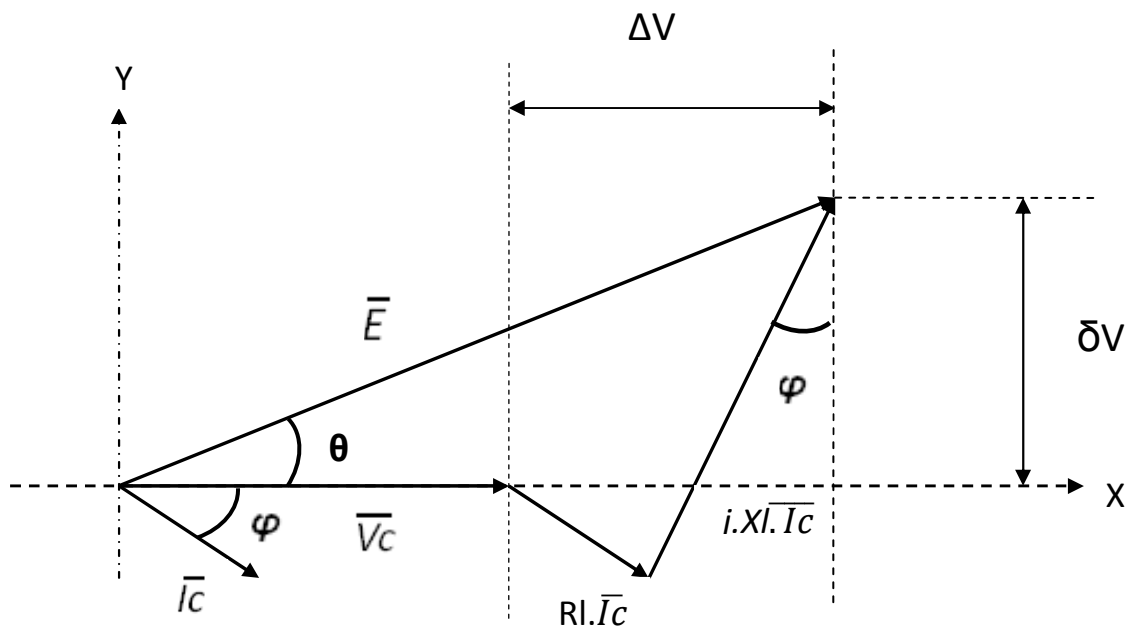


Fig.III.2 Diagramme vectoriel des grandeurs électriques.

A partir du diagramme vectoriel **[Figure(III.2)]**, on établit les équations et en se basant sur quelques formules classiques, on aboutit donc à l'expression de la chute de tension sur une ligne de transmission **[équation(III.2)]**.

$$E^2 = (V_c + \Delta V)^2 + (\delta V)^2$$

Sur l'axe des X:

$$\Delta V = Rl \cdot Ic \cos \varphi + Xl \cdot Ic \sin \varphi$$

Sur l'axe des Y :

$$\delta V = X_L \cdot Ic \cos \varphi - Rl \cdot Ic \sin \varphi$$

$$P = V_c \cdot Ic \cos \varphi \quad I_x = Ic \cos \varphi = \frac{P}{V_c}$$

$$Q = V_c \cdot Ic \sin \varphi \quad I_y = Ic \sin \varphi = \frac{Q}{V_c}$$

On déduit que :

$$\Delta V = \left(\frac{Rl \cdot P + X_L \cdot Q}{V_c} \right) \quad \text{et} \quad \delta V = \left(\frac{X_L \cdot P - Rl \cdot Q}{V_c} \right)$$

Si $\delta V \ll V_c + \Delta V$ Alors :

La chute de tension aura donc pour expression ;

$$E - V_C = \left(\frac{R_L \cdot P}{V_C} + \frac{X_L \cdot Q}{V_C} \right) = \Delta V \dots \dots \dots (III.1)$$

Et comme sur une ligne de transport la réactance inductive est dix fois plus grande que la résistance de la ligne, on aboutit à l'expression simplifiée :

$$\Delta V = \left(\frac{X_L \cdot Q}{V_C} \right) \dots \dots \dots (III.2)$$

Il est important de remarquer que les transferts d'énergie réactive vont toujours dans le sens des tensions décroissantes autrement dit la relation précédente (III.2) montre que le transport d'énergie réactive aura une influence plus marquée sur la chute de tension. On peut aisément déduire que ce sont les transits de puissance réactive qui sont à l'origine des plus importantes chutes de tension sur les lignes de transmission.

III.1.2 Puissance transmissible en fonction de l'angle interne

Pour trouver l'expression de la puissance active consommée par une charge en fonction de l'angle interne, on considère une ligne de transport inductive par l'intermédiaire de laquelle est alimentée une charge d'impédance \overline{Z}_C , de module Z_C et de déphasage φ , à partir d'une source de tension constante E [Figure(III.3)].

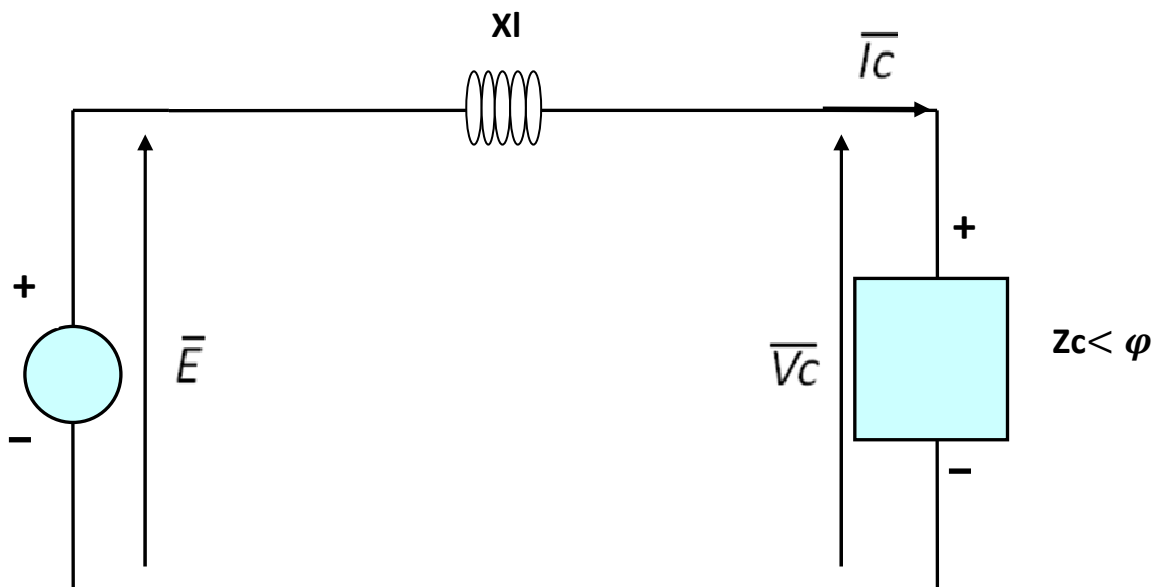


Fig.III.3 Schéma représentatif du circuit considéré.

Pour établir cette relation, on va tracer le diagramme vectoriel suivant :

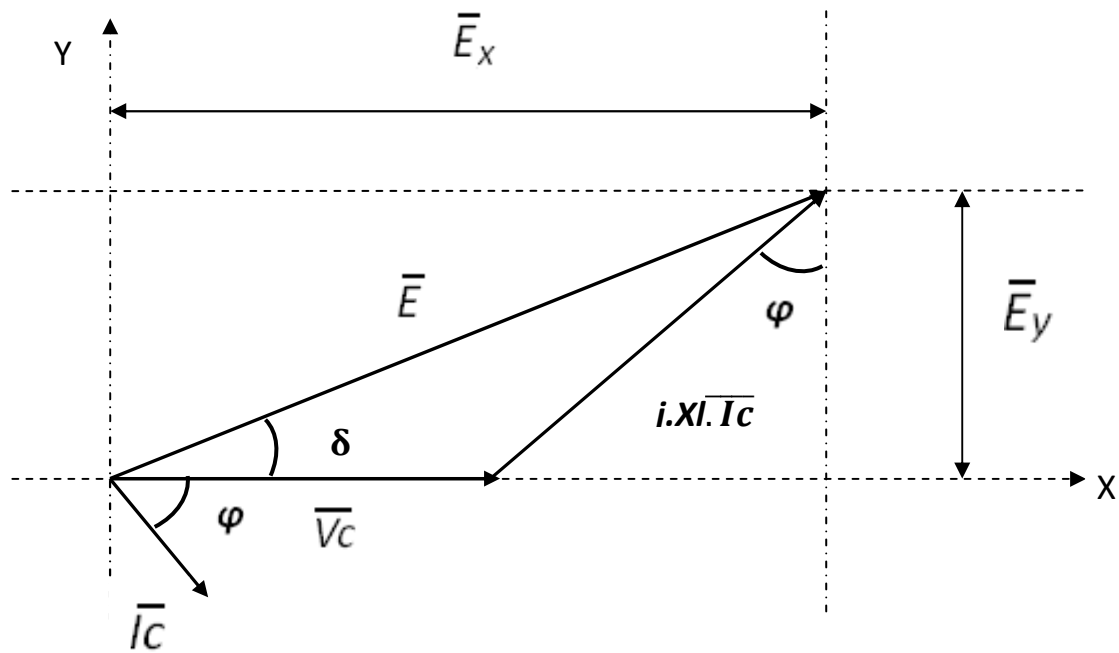


Fig.III.4 Diagramme vectoriel des grandeurs électriques.

A partir de ce diagramme vectoriel, et en se basant sur quelques formules classiques, on aura :

$$P = V_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots (a)$$

$$\sin \delta = \frac{E_y}{E} \Rightarrow E_y = E \cdot \sin \delta \dots \dots \dots (b)$$

$$\cos \varphi = \frac{E_y}{X_L \cdot I_C} \Rightarrow E_y = X_L \cdot I_C \cdot \cos \varphi \dots \dots \dots (c)$$

$$(b) = (c) \Rightarrow E \cdot \sin \delta = X_L \cdot I_C \cdot \cos \varphi \Rightarrow I_C \cdot \cos \varphi = \frac{E}{X_L} \cdot \sin \delta \dots \dots \dots (d)$$

En remplaçant l'équation (d) dans l'équation (a), on obtient l'expression donnant la puissance active en fonction de l'angle interne (δ) :

$$P = \frac{E \cdot V_C}{X_L} \cdot \sin(\delta) \dots \dots \dots \text{(III.3)}$$

Et de cette équation (III.3), on déduit la relation suivante :

$$\delta = \text{Arc sin} \frac{P \cdot X_L}{E \cdot V_C} \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

Le transport de la puissance active influencera beaucoup plus le déphasage.

III.1.3 Equation mécanique [18] :

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \Omega_r - \Omega_s \dots \dots \dots (III.5)$$

Pour trouver l'expression donnant la vitesse de rotation, on va faire appel à l'intégrale de l'équation mathématique précédente (III.4).

$$d\delta = (\Omega_r - \Omega_s) \cdot dt$$

$$\int d\delta = \int (\Omega_r - \Omega_s) \cdot dt + \delta_0$$

$$\Rightarrow \delta = (\Omega_r - \Omega_s) \cdot t + \delta_0 \Rightarrow \delta = \Omega_r \cdot t - \Omega_s \cdot t + \delta_0$$

$$\Rightarrow \Omega_r \cdot t = \delta - \delta_0 + \Omega_s \cdot t$$

Avec $\Omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f$

$$\Rightarrow \Omega_r = \left(\frac{\delta - \delta_0 + \Omega_s \cdot t}{t} \right) \dots \dots \dots (III.6)$$

III.1.4 Processus de la stabilité en tension

Pour traiter le processus de la stabilité en tension, on considère une source de tension constante alimentant une charge impédante de module Z_c et de déphasage φ à travers une ligne impédante de module Z_L et de déphasage θ . le schéma du circuit utilisé est donné en [figure (III.5)].

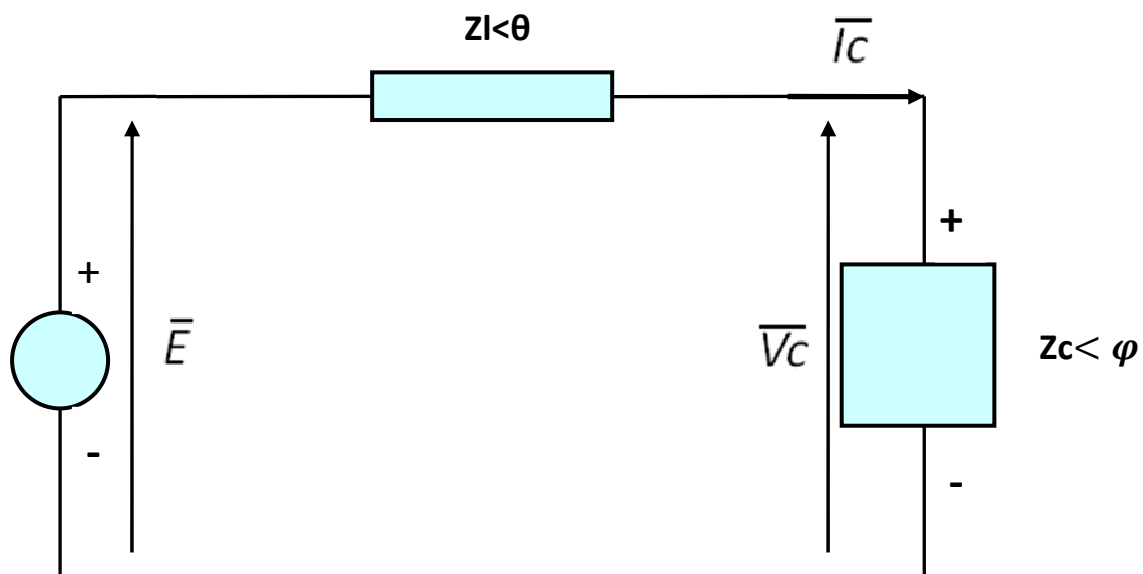


Fig.III.5 Schéma représentatif du circuit utilisé.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} \bar{E} = \bar{Z}_L \bar{I}_C + \bar{V}_C \\ \bar{V}_C = \bar{Z}_C \bar{I}_C \end{cases} \Rightarrow \bar{E} = (\bar{Z}_L + \bar{Z}_C) \bar{I}_C$$

III.1.4.1 Expression du courant circulant à travers la charge

L'expression du courant circulant à travers la charge est donnée par ;

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_L = Z_L(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

Après le développement de ces équations en [ANNEXE (I.1.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant:

$$I_C = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.7)$$

III.1.4.2 Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\begin{cases} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \Rightarrow \end{cases}$$

$$V_C = \frac{Z_C E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.8)$$

III.1.4.3 Expression de la puissance active délivrée à la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 P_C = V_C I_C \cos\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C \cdot E^2}{Z_L^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos\varphi \dots\dots\dots \text{(III.9)}$$

III.1.4.4 Expression de la puissance réactive délivrée à la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C \cdot E^2}{Z_L^2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \cdot \sin\varphi \dots\dots\dots \text{(III.10)}$$

III.1.4.5 Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge.

Le maximum de puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne ($Z_C = Z_L$) [ANNEXE (I.1.2)].

$$\Rightarrow P_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_L[1+\cos(\theta-\varphi)]} \cos\varphi \dots\dots\dots(\text{III.11})$$

III.1.4.6 Expression de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est la même procédure que pour la puissance active [ANNEXE (I.1.3)] d'où l'expression ci-dessous:

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_L[1+\cos(\theta-\varphi)]} \sin\varphi \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

III.1.4.7 Expression du courant critique

Au moment où la puissance atteint son maximum, le courant enregistré en ce point est appelé courant critique [ANNEXE(I.1.4)].

L'expression donnant le courant critique noté $I_{C \text{ crit}}$ est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = Z_L) = \frac{E}{Z_L[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots(\text{III.13})$$

III.1.4.8 Expression de la tension critique

Comme pour le courant, la tension critique est atteinte lorsque $Z_C=Z_L$. En remplaçant donc Z_C par Z_L dans l'équation (III.7), on obtient l'expression [ANNEXE(I.1.5)] suivante:

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = Z_L) = \frac{E}{[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots (\text{III.14})$$

D'après les équations [(III.7),..., (III.10)], on observe que les quatre paramètres dépendent tous de la tension de source E , et de l'impédance de la ligne Z_L et du facteur de puissance $\cos(\varphi)$. Après cette mise en équations, on constate que les grandeurs électriques (courant, tension, et puissances active et réactive) sont proportionnelles à la tension d'alimentation E et inversement proportionnelles à l'impédance de la ligne Z_L .

On remarque que les puissances maximales transmises augmentent avec l'augmentation de la tension de source E , du facteur de puissance $\cos(\varphi)$, et avec la diminution de la l'impédance de la ligne Z_L [(III.11), (III.12)].

Le courant et la tension critiques dépendent de la tension d'alimentation E , mais on remarque que seulement le courant critique dépend de l'impédance de la ligne [équations (III.13), (III.14)].

III.1.5 Phénomène de la rupture de synchronisme

III.1.5.1 Ligne inductive et charge impédante

Pour illustrer ce phénomène, on se base sur les résultats obtenus lors de la mise en évidence du processus de la stabilité en tension, sauf que pour tous les cas qu'on va considérer, la résistance de la ligne est négligée devant la réactance inductive de cette dernière, donc la ligne de transport est purement inductive.

Le circuit électrique considéré est le suivant :

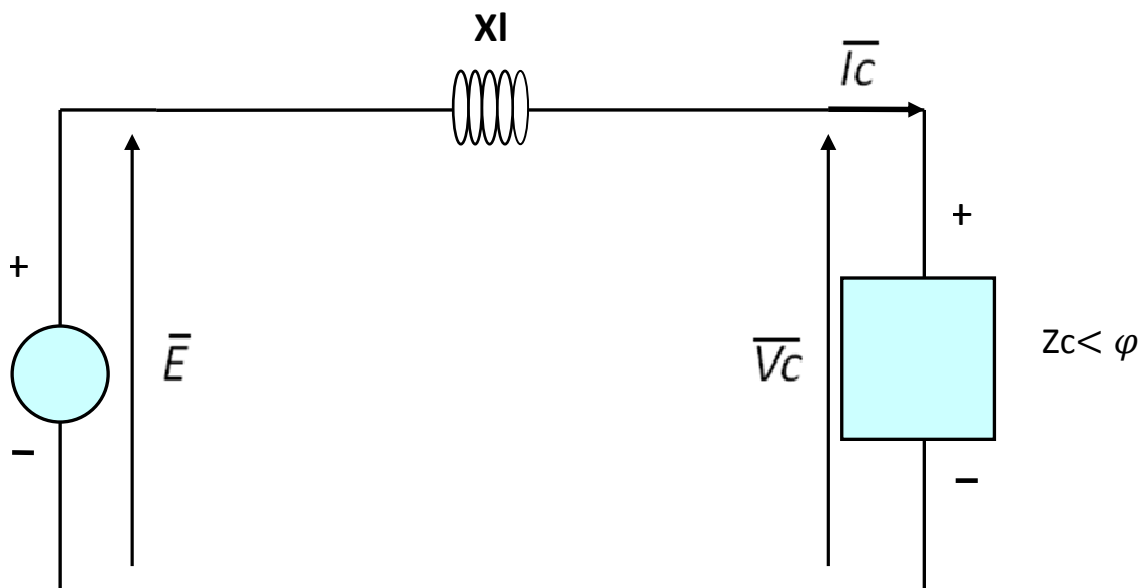


Fig.III.6 Schéma représentatif du circuit considéré.

L'écriture complexe de l'équation pour ce circuit est :

$$\bar{E} = jX_L \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

III.1.5.1.a Expression du courant circulant à travers la charge

$$\bar{E} = jX_L \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

Après le développement de cette équation en [ANNEXE (I.2.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant:

$$I_C = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.15)$$

III.1.5.1.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow V_C = \frac{Z_C E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.16)$$

III 1.5.1.c Expression de la puissance active transitée à la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C = V_C I_C \cos\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E}{X_L^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi\right]} \cos\varphi \dots\dots\dots(III.17)$$

III.1.5.1.d Expression de la puissance réactive délivrée à la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}} \\
 I_C = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E}{X_L^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L}\right) \sin\varphi \right]} \sin\varphi \dots\dots\dots(III.18)$$

III.1.5.1.e Expression de la puissance active maximale

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge.

Le maximum de puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance de la ligne ($Z_C = X_L$) [ANNEXE(I.2.2)] :

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_L[1+\sin\varphi]} \cos\varphi \dots\dots\dots(III.19)$$

III.1.5.1.f Expression de la puissance réactive maximale

C'est la même procédure que pour la puissance active [ANNEXE(I.2.3)] d'où l'expression ci-dessous:

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_L[1+\sin\varphi]} \sin\varphi \dots\dots\dots(III.20)$$

III.1.5.1.g Expression du courant critique

L'expression donnant le courant critique noté $I_{C \text{ crit}}$ [ANNEXE (I.2.4)] est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_L) = \frac{E}{X_L[2(1+\sin\varphi)]} \dots\dots\dots(III.21)$$

III.1.5.1.h Expression de la tension critique

L'expression donnant la tension critique noté $V_{C\ crit}$ [ANNEXE (I.2.5)] est :

$$V_{C\ crit} = V_C(Z_C = X_L) = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin\varphi)}} \dots \dots \dots (III. 22)$$

III.1.5.2 Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur.

Pour cette partie, le réseau utilisé est aussi identique à celui du premier cas, sauf qu'on introduit cette fois-ci la réactance synchrone de l'alternateur (X_s).

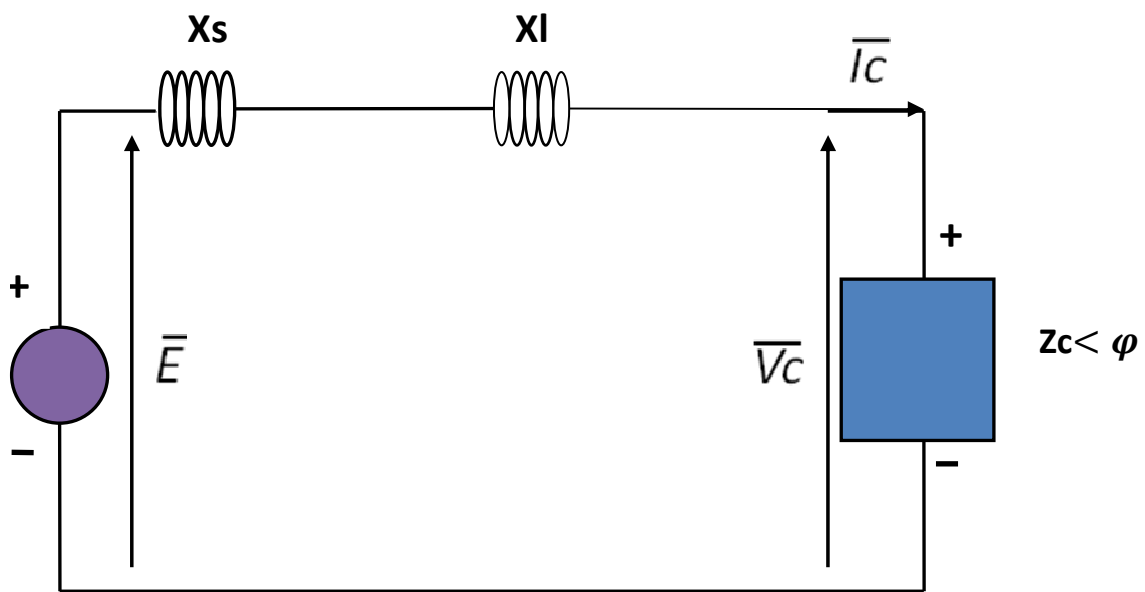


Fig.III.7 Schéma représentatif du circuit considéré.

Les équations électriques sont :

$$\bar{E} = j(X_S + X_L)\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T0}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C \quad \text{avec} \quad X_{T0} = X_S + X_L$$

III.1.5.2.a Expression du courant circulant à travers la charge

Après avoir développé cette équation en annexe [(I.3.1)], on aboutit à l'expression du module du courant :

$$I_C = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)\sin\varphi}} \dots \dots \dots (III.23)$$

III.1.5.2.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow V_C = \frac{Z_C E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}} \dots \dots \dots (III.24)$$

III.1.5.2.c Expression de la puissance active transitée à la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C = V_C I_C \cos\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T0}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi \right]} \cos\varphi \dots \dots \dots (III.25)$$

III.1.5.2.d Expression de la puissance réactive délivrée à la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}} \\
 I_C = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T0}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right) \sin\varphi \right]} \sin\varphi \dots\dots\dots(III.26)$$

III.1.5.2.e Expression de la puissance active maximale délivrée à la charge.

De la même manière que pour le premier cas, on détermine l'expression de la puissance maximale, ce maximum est atteint quand la valeur de l'impédance de la charge est égale à la réactance totale (**Zc=X_{T0}**) [ANNEXE(I.3.2)] :

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T0}[1+\sin\varphi]} \cos\varphi \dots\dots\dots(III.27)$$

III.1.5.2.f Expression de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

En suivant la même démarche que pour la puissance active [ANNEXE(I.3.3)], on obtient :

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T0}[1+\sin\varphi]} \sin\varphi \dots\dots\dots(III.28)$$

III.1.5.2.g Expression du courant critique (I_{crit})

L'expression donnant le courant critique [ANNEXE (I.3.4)] est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T0}) = \frac{E}{X_{T0}\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots\dots\dots(III.29)$$

III.1.5.2.h Expression de la tension critique

En remplaçant **Z_C** par **X_{T0}** dans l'équation (III.23) [ANNEXE (I.3.5)], on obtient :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T0}) = \frac{E}{\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots\dots\dots(III.30)$$

III.1.5.3 Ligne inductive, et charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la réactance inductive du transformateur (X_{Tr})

Le circuit considéré pour ce cas est le suivant :

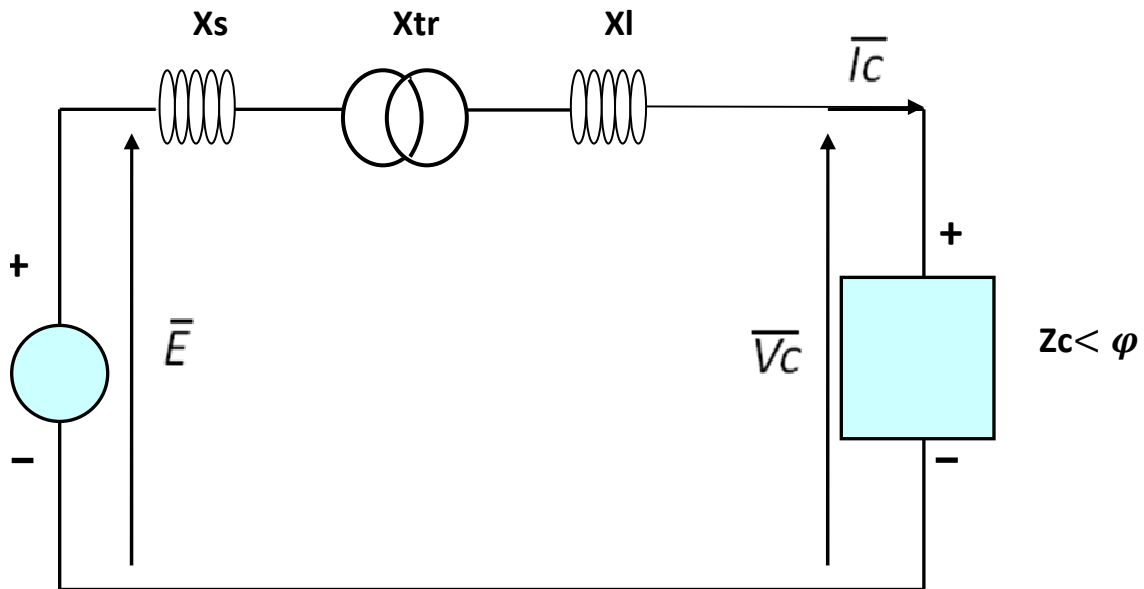


Fig.III.8 Schéma représentatif du circuit considéré.

L'écriture complexe pour le circuit est :

$$\bar{E} = j[X_S + X_L + X_{Tr}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

III.1.5.3.a Expression du courant circulant à travers la charge

$$\bar{E} = j[X_S + X_L + X_{Tr}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T1}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

Avec $X_{T1} = X_S + X_L + X_{Tr}$

Après avoir développé cette équation en **[ANNEXE (I.4.1)]**, on aboutit à l'expression donnant le module du courant :

$$I_C = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \cdot \sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.31)$$

III.1.5.3.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\begin{cases} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_C = \frac{Z_C E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.32)$$

III.1.5.3.c Expression de la puissance active absorbée par la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases} P_C = V_C I_C \cos\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T1}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi\right]} \cos\varphi \dots\dots\dots(III.33)$$

III.1.5.3.d Expression de la puissance réactive absorbée par la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases} Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}}\right) \sin\varphi}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T1}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T1}} \right) \sin\varphi \right]} \sin\varphi \dots \dots \dots \text{(III.34)}$$

III.1.5.3.e Expression de la puissance active maximale absorbée par la charge

Le maximum de puissance est atteint lorsque l'impédance de la charge Z_C devient égale à la réactance totale de la ligne X_{T1} [ANNEXE (I. 4. 2)].

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T1}[1+\sin\varphi]} \cos\varphi \dots \dots \dots \text{(III.35)}$$

III.1.5.3.f Expression de la puissance réactive maximale absorbée

C'est la même procédure que pour la puissance active [ANNEXE (I.4.3)]

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T1}[1+\sin\varphi]} \sin\varphi \dots \dots \dots \text{(III.36)}$$

III.1.5.3.g Expression du courant critique:

L'expression donnant le courant critique (I_{crit}) [ANNEXE (I.4.4)] est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T1}) = \frac{E}{X_{T1}\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III.37)}$$

III.1.5.3.h Expression de la tension critique

L'expression de la tension critique (V_{crit}) [ANNEXE (I.4.5)] est :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T1}) = \frac{E}{\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III.38)}$$

III.1.5.4 Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la compensation série locale (X_{C1})

Cette étape sera consacrée à la mise en évidence de la compensation de la puissance réactive sur le processus de la perte de synchronisme :

Le circuit électrique est identique à celui du cas précédent sauf qu'on insère un condensateur de réactance capacitive (X_{C1}) en série avec la charge traitée.

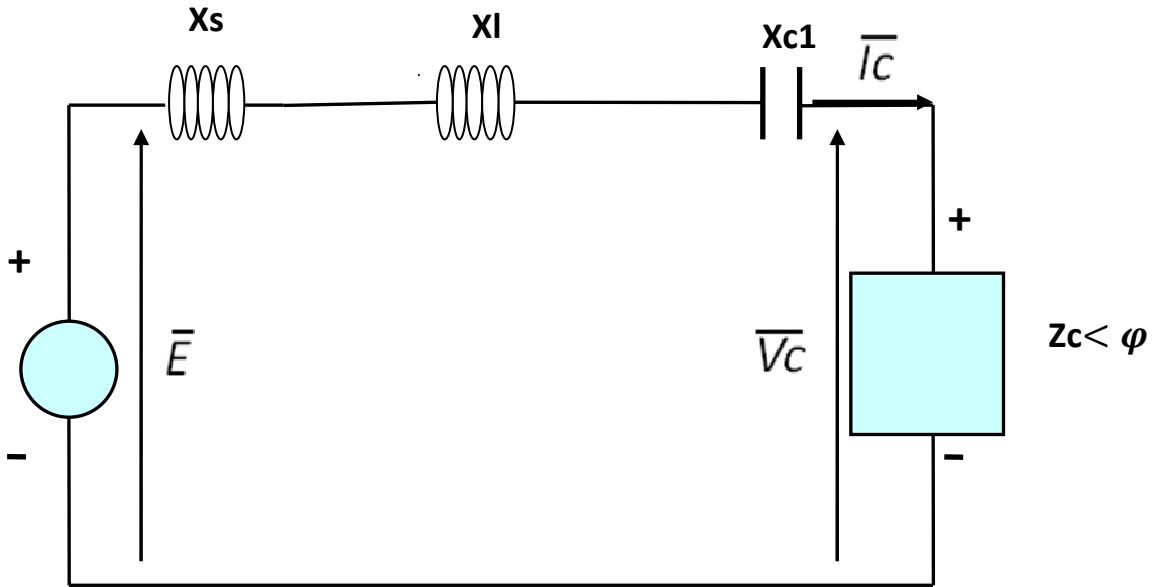


Fig.III.9 Schéma représentatif du circuit considéré.

L'écriture complexe pour le circuit est :

$$\bar{E} = j[X_S + X_L - X_{C1}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

III.1.5.4.a Expression du courant circulant à travers la charge

$$\bar{E} = j[X_S + X_L - X_{C1}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T2}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

Avec $X_{T2} = X_S + X_L - X_{C1}$

Après avoir développé cette équation [ANNEXE (I.5.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant.

$$I_C = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)\sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.39)$$

III.1.5.4.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)\sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow V_C = \frac{Z_C E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi}} \dots\dots\dots (III.40)$$

III.1.5.4.c Expression de la puissance active absorbée par la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C = V_C I_C \cos\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T2}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi \right]} \cos\varphi \dots\dots\dots (III.41)$$

III.1.5.4.d Expression de la puissance réactive absorbée par la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T2}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T2}}\right) \sin\varphi \right]} \sin\varphi \dots\dots\dots (III.42)$$

III.1.5.4.e Expression de la puissance active maximale absorbée par la charge

Le maximum de puissance est atteint lorsque l'impédance de la charge devient égale à la réactance totale ($Z_C = X_{T2}$) [ANNEXE (I.5.2)] :

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T2}[1+\sin\varphi]} \cos\varphi \dots\dots\dots (III.43)$$

III.1.5.4.f Expression de la puissance réactive maximale absorbée par la charge

C'est la même procédure que pour la puissance active [ANNEXE (I.5.3)] :

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T2}[1+\sin\varphi]} \sin\varphi \dots\dots\dots (III.44)$$

III.1.5.4.g Expression du courant critique

L'expression donnant le courant critique (I_{crit}) [ANNEXE (I.5.4)] est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T2}) = \frac{E}{X_{T2}\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots\dots\dots (III.45)$$

III.1.5.4.h Expression de la tension critique

L'expression de la tension critique (V_{crit}) [ANNEXE (I.5.5)] est :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T2}) = \frac{E}{\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots\dots\dots (III.46)$$

III.1.5.5 Ligne inductive, charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la compensation série locale et globale (X_{C1}, X_{C2})

La charge impédante est à présent alimentée par une source de tension constante par l'intermédiaire d'une ligne inductive de réactance X_l en introduisant la compensation série locale et globale.

Le circuit considéré est le suivant :

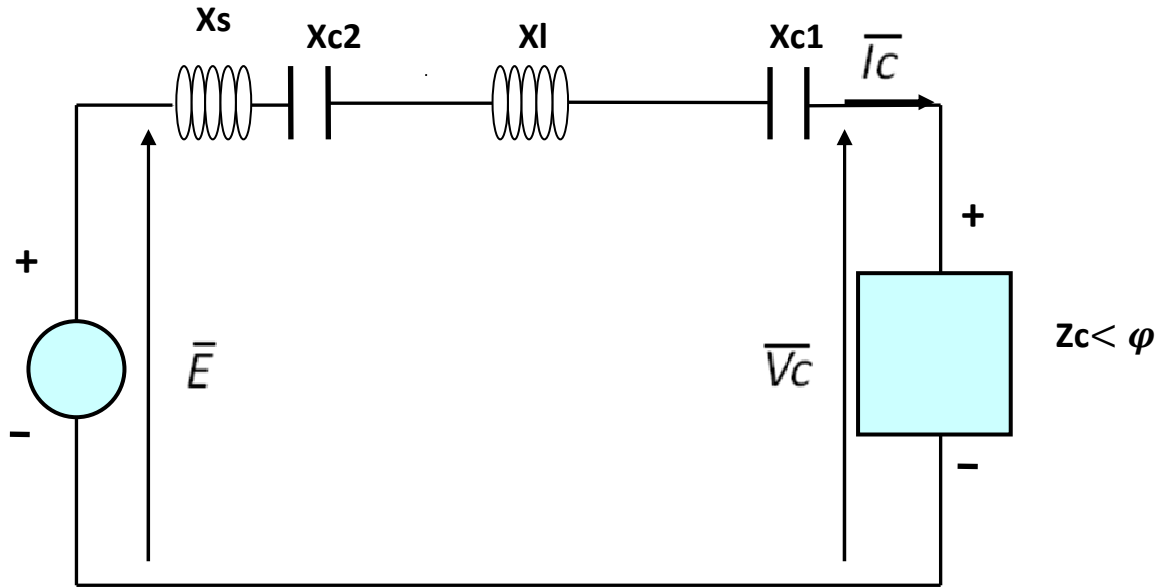


Fig.III.10 Schéma représentatif du circuit considéré

L'écriture complexe pour le circuit est :

$$\bar{E} = j[X_S - X_{C2} + X_L - X_{C1}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

III.1.5.5.a Expression du courant circulant à travers la charge

$$\bar{E} = j[X_S - X_{C2} + X_L - X_{C1}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T3}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

Avec $X_{T3} = X_S - X_{C2} + X_L - X_{C1}$

Après avoir développé cette équation en [ANNEXE (I.6.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant :

$$I_C = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)\sin\varphi}} \dots\dots\dots(III.47)$$

III.1.5.5.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)\sin\varphi}} \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$V_C = \frac{Z_C E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi}} \dots\dots\dots (III.48)$$

III.1.5.5.c Expression de la puissance active absorbée par la charge

La puissance active délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C = V_C I_C \cos\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T3}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi \right]} \cos\varphi \dots\dots\dots (III.49)$$

III.1.5.5.d Expression de la puissance réactive absorbée par la charge

La puissance réactive délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi}} \\ I_C = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T3}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin\varphi \right]} \sin\varphi \dots\dots\dots (III.50)$$

III.1.5.5.e Expression de la puissance active maximale absorbée par la charge

Le maximum de la puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance totale de la ligne ($Z_C = X_{T3}$) [ANNEXE (I.6.2)].

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T3}[1+\sin\varphi]} \cos\varphi \dots \dots \dots \text{(III.51)}$$

III.1.5.5.f Expression de la puissance réactive maximale absorbée par la charge

En suivant la même procédure que pour la puissance active maximale transmise, le développement de l'équation (III.49) en [ANNEXE (I.6.3)], on obtient :

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T3}[1+\sin\varphi]} \sin\varphi \dots \dots \dots \text{(III.52)}$$

III.1.5.5.g Expression du courant critique

L'expression du courant critique (I_{crit}) [ANNEXE (I.6.4)] est donnée par :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T3}) = \frac{E}{X_{T3}\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III.53)}$$

III.1.5.5.h Expression de la tension critique (V_{crit})

L'expression de la tension critique (V_{crit}) [ANNEXE (I.6.5)] est donnée par :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T3}) = \frac{E}{\sqrt{2(1+\sin\varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III.54)}$$

D'après les équations [(III.15),..., (III.18)] pour le cas d'une ligne purement inductive. Pour le cas d'une ligne inductive et en considérant la réactance synchrone de l'alternateur [(III.23),..., (III.26)], pour le cas d'une ligne inductive et en considérant la réactance synchrone de l'alternateur et celle du transformateur [(III.31),..., (III.34)], pour le cas de la compensation série locale et en considérant la réactance synchrone de l'alternateur [(III.39),..., (III.42)], puis le cas de la compensation série locale et globale et en considérant la réactance synchrone de l'alternateur [(III.47),..., (III.50)].

Dans tous les cas étudiés, le courant circulant à travers la charge, la tension réceptrice et les puissances active et réactive délivrées à cette dernière sont inversement proportionnels à la réactance totale du réseau de transmission.

Les équations [(III.17) et (III.18)], [(III.25) et (III.26)], [(III.33) et (III.34)], [(III.41) et (III.42)] et [(III.49) et (III.50)] relatives respectivement aux puissances active et réactive délivrées à la charge montrent aussi leurs proportionnalités à la tension de source et du facteur de puissance.

Les puissances active et réactive transitées vers la charge atteignent leurs valeurs maximales lorsque l'impédance de la charge Z_c est égale à la réactance totale du système de transmission.

On remarque que les puissances maximales transmises augmentent avec l'augmentation de la tension de source E , du facteur de puissance, et avec la diminution de la réactance totale du réseau de transmission [(III.19),(III.20)], [(III.27),(III.28)], [(III.35),(III.36)], [(III.43),(III.44)], [(III.51),(III.52)].

Le courant et la tension critiques dépendent de la tension de source E . Le courant dépend aussi de la réactance totale du système de transmission ce qui n'est pas le cas pour la tension critique, [(III.21), (III.22)], [(III.29), (III.30)], [(III.37), (III.38)], [(III.45), (III.46)], [(III.53), (III.54)].

III.1.6 Phénomène des surcharges en cascade

Pour l'étude de ce phénomène, on considère un système simplifié presque identique à celui utilisé pour la mise en évidence du processus de la stabilité en tension, sauf que le réseau de transmission cette fois-ci est initialement constitué de trois lignes de transport en parallèle, d'impédances Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L3} ceci pour la première phase de fonctionnement considérée, par la suite le fonctionnement avec deux lignes de transmission (après la perte d'une ligne de transmission), et enfin la phase de fonctionnement avec une seule ligne de transport (après l'ouverture simultanée des deux lignes(2) et (3)).

III.1.6.1 Première phase (fonctionnement avec trois lignes de transmission)

On considère le circuit suivant :

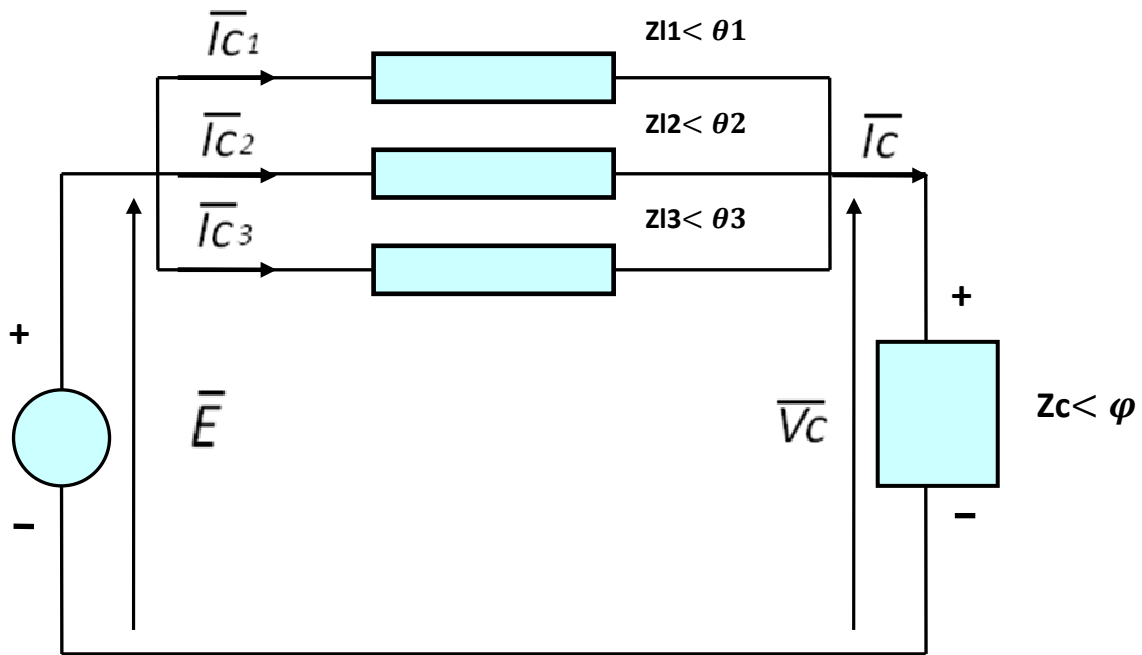


Fig.III.11 Schéma représentatif du circuit considéré.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} \bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \bar{I}_C + \bar{V}_C \\ \bar{V}_C = \bar{Z}_C \bar{I}_C \end{cases} \Rightarrow \bar{E} = (\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C) \bar{I}_C$$

Avec :

$$\bar{Z}_{Leq} = \frac{\bar{Z}_{L1} \bar{Z}_{L2} \bar{Z}_{L3}}{\bar{Z}_{L1} \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L1} \bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{L2} \bar{Z}_{L3}}$$

III.1.6.1.a Expression des courants transités à la charge

- Le courant total transité vers la charge

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_{Leq} = Z_{Leq} (\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C (\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

Après avoir développé ces équations [ANNEXE (I.7.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant :

$$I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.55)$$

• **Les courants partiels transités par ligne**

En utilisant la méthode du diviseur de courant, on obtient les expressions des courants partiels (par ligne) :

$$I_{C1} = \frac{Z_{L1}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L1}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.56)$$

$$I_{C2} = \frac{Z_{L2}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L2}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.57)$$

$$I_{C3} = \frac{Z_{L3}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L3}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.58)$$

III.1.6.1.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \Rightarrow \end{array} \right.$$

$$V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.59)$$

III.1.6.1.c Expression des puissances actives transitées à la charge

• **Expression de la puissance totale délivrée à la charge**

La puissance active totale délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 P_C = V_C I_C \cos \varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C \cdot E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \dots \text{(III.60)}$$

• **Expressions des puissances actives partielles transitées par ligne à la charge**

Les puissances actives partielles (par lignes) délivrées à la charge auront pour expressions :

$$P_{C1} = V_C I_{C1} \cos \varphi = \frac{Z_{L1}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \text{(III. 61)}$$

$$P_{C2} = V_C I_{C2} \cos \varphi = \frac{Z_{L2}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \text{(III. 62)}$$

$$P_{C3} = V_C I_{C3} \cos \varphi = \frac{Z_{L3}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \text{(III. 63)}$$

III.1.6.1.d Expression de la puissance réactive délivrée à la charge

La puissance réactive totale délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \sin\varphi \dots \dots \dots (III.64)$$

III.1.6.1.e Expression de la puissance active maximale absorbée par la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge.

Le maximum de puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne ($Z_C = Z_{Leq}$) [ANNEXE (I.7.2)].

$$\Rightarrow P_C \max = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos\varphi \dots \dots \dots (III.65)$$

III.1.6.1.f Expression de la puissance réactive maximale

C'est la même procédure que pour la puissance active, [ANNEXE (I.7.3)], on obtient l'expression ci-dessous:

$$Q_C \max = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin\varphi \dots \dots \dots (III.66)$$

III.1.6.1.g Expression du courant critique

Au moment où la puissance atteint son maximum, le courant enregistré en ce point est appelé courant critique [ANNEXE (I.7.4)].

L'expression donnant le courant critique noté $I_C \text{ crit}$ est :

$$I_C \text{ crit} = I_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{Z_{Leq}[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]} \dots \dots \dots (III.67)$$

III.1.6.1.h Expression de la tension critique

Comme pour le courant, la tension critique est atteinte lorsque $Z_C = Z_{Leq}$. En remplaçant donc Z_C par Z_{Leq} dans l'équation (III.59), on obtient l'expression [ANNEXE (I.7.5)] suivante:

$$V_{C\ crit} = V_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots(III.68)$$

III.1.6.2 Seconde phase (perte de la ligne de transmission (3))

On considère le circuit suivant qui est le même circuit que celui utilisé précédemment sauf que la ligne(3) est non fonctionnelle :

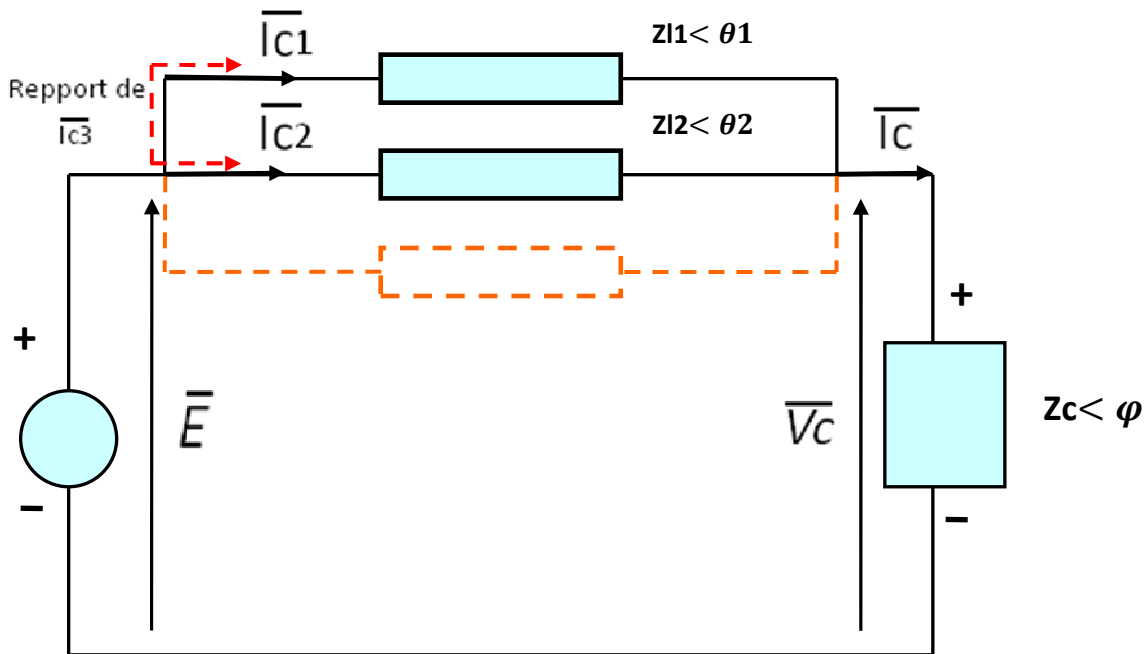


Fig.III.12 Schéma représentatif du circuit considéré.

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} \bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \bar{I}_C + \bar{V}_C \\ \bar{V}_C = \bar{Z}_C \bar{I}_C \end{cases} \Rightarrow \bar{E} = (\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C) \bar{I}_C$$

où : Z_{Leq} est l'impédance équivalente du système de transmission, et en prenant en considération les repports de charges de la ligne (3) vers les lignes (1) et (2).

III.1.6.2.a Expression des courants transités à la charge

- **Le courant total**

Etant donné que le courant total transité à la charge est le même que celui acheminé à cette dernière lors de la précédente phase (puisque le courant total se conserve), on trouve la même expression donnant le courant :

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_{Leq} = Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

Après avoir développé ces équations [ANNEXE (I.8.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant :

$$I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.69)$$

- **Les courants partiels transités par ligne**

En utilisant la méthode du diviseur de courant, et en considérant les impédances équivalentes relatives, on aboutit aux expressions des courants partiels (par ligne) :

$$I_{C1} = \left[Z_{Leq} \cdot \left(\frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L3}} \cdot \frac{Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right] \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots\dots(III.70)$$

$$I_{C2} = \left[Z_{Leq} \cdot \left(\frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L3}} \cdot \left(\frac{Z_{L1} - Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right) \right] \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots\dots(III.71)$$

$$I_{C3} = 0$$

III.1.6.2.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \dots \dots \dots (III.72)$$

III.1.6.2.c Expression des puissances actives transitées à la charge

- **Expression de la puissance totale délivrée**

La puissance active totale délivrée à la charge aura pour expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C = V_C I_C \cos \varphi \\ V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\ I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \dots (III.73)$$

- **Expressions des puissances actives partielles transitées par ligne**

Les puissances actives partielles (par lignes) délivrées à la charge auront pour expressions :

$$P_{C1} = V_C I_{C1} \cos \varphi$$

$$= \left[Z_{Leq} \cdot \left(\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L3}} \cdot \frac{Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right] \cdot \frac{Z_C E^2}{Z_{leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi \dots (III.74)$$

$$P_{C2} = V_C I_{C2} \cos \varphi$$

$$= \left[Z_{Leq} \left(\frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L3}} \left(\frac{Z_{L1} - Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right) \right] \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi \dots (III.75)$$

$$P_{C3} = 0$$

III.1.6.2.d Expression de la puissance réactive délivrée à la charge

L'expression de la puissance réactive totale délivré à la charge est donnée par :

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin\varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \sin\varphi \dots\dots\dots (III.76)$$

III.1.6.2.e Expression de la puissance active maximale

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge.

Le maximum de puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne ($Z_C = Z_{Leq}$) [ANNEXE (I.9.2)].

$$\Rightarrow P_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos\varphi \dots\dots\dots (III.77)$$

III.1.6.2.f Expression de la puissance réactive maximale

C'est la même procédure que pour la puissance active, [ANNEXE (I.8.3)] d'où l'expression ci-dessous:

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin\varphi \dots\dots\dots (III.78)$$

III.1.6.2.g Expression du courant critique

Au moment où la puissance atteint son maximum, le courant enregistré en ce point est appelé courant critique [ANNEXE (I.8.4)].

L'expression donnant le courant critique noté $I_{C \text{ crit}}$ est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C \left(Z_C = Z_{Leq} \right) = \frac{E}{Z_{Leq}[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]} \dots\dots\dots (III.79)$$

III.1.6.2.h Expression de la tension critique

Comme pour le courant, la tension critique est atteinte lorsque $Z_C = Z_{Leq}$. En remplaçant donc Z_C par Z_{Leq} dans l'équation (III.72), on obtient l'expression [ANNEXE (I.8.5)] suivante:

$$V_{C\ crit} = V_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots(III.80)$$

III.1.6.3 Troisième phase (perte des lignes de transmission (2) et (3))

On considère le circuit suivant qui est le même circuit que celui utilisé lors de la première phase sauf qu'à présent il y'a perte simultanée des lignes (3) et (2):

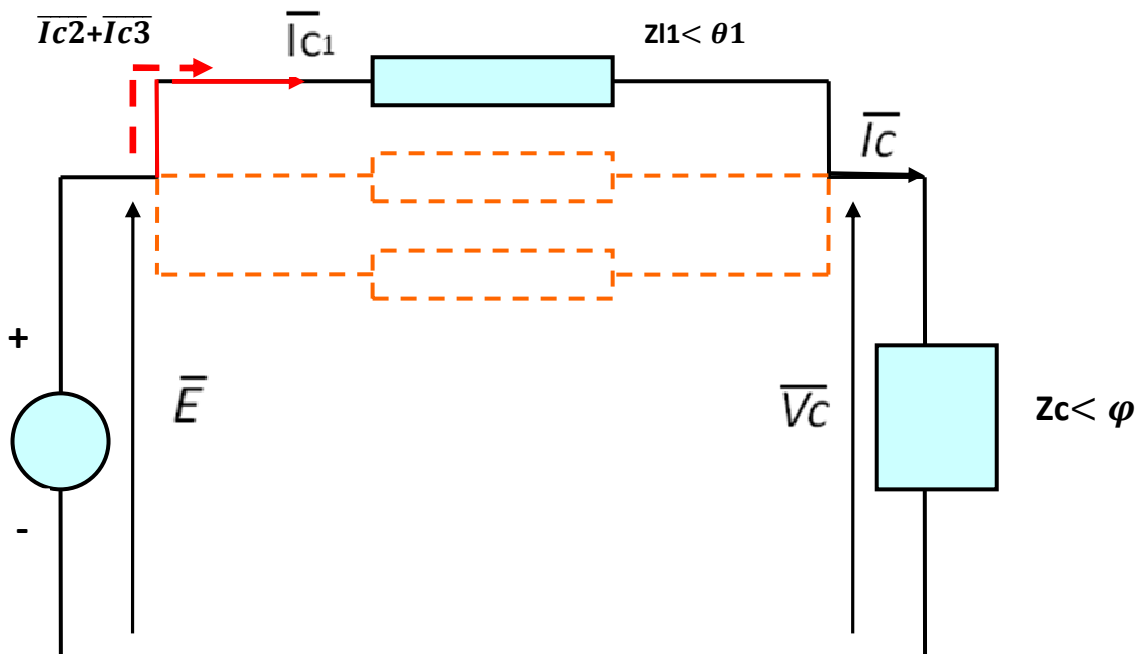


Fig.III.13 Schéma représentatif du circuit considéré.

III.1.6.3.a Expressions des courants transités à la charge

- Le courant total transité à la charge

Sachant que le courant total se conserve et passe intégralement par la ligne (1), on trouve les expressions suivantes :

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2} + \bar{I}_{C3} \quad (\text{tous les courants transitant par la ligne (1)})$$

$$\text{Et } \bar{I}_C = \bar{I}_{C1} \quad \text{car } (\bar{I}_{C2} = \bar{I}_{C3} = 0)$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{C1} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_{Leq} = Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

Après avoir développé ces équations [ANNEXE (I.9.1)], on aboutit à l'expression donnant le module du courant :

$$I_C = I_{C1} = \frac{E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III. 81)}$$

• **Les courants transités par ligne**

En se basant sur les lois d'impédances relatives, on obtient les expressions du courant partiel (par ligne), et Sachant que tout le courant passe par la ligne (1) :

$$I_{C1} = I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III. 82)}$$

$$I_{C2} = 0 \quad \text{et} \quad I_{C3} = 0$$

III.1.6.3.b Expression de la tension réceptrice

Le module de la tension réceptrice sera donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_C = Z_C I_C \\ I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)\cos(\theta - \varphi)}} \dots \dots \dots \text{(III.83)}$$

III.1.6.3.c Expressions des puissances actives transitées à la charge

• **Expression de la puissance totale délivrée à la charge**

La puissance active totale délivrée à la charge aura pour expression :

$$\begin{cases}
 P_C = V_C I_C \cos \varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow P_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots \dots \dots (\text{III.84})$$

• **Expressions des puissances actives partielles (par ligne) transitées**

La puissance active transitant via la ligne **(1)** est :

$$P_{C1} = V_C I_{C1} \cos \varphi = P_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi \dots (\text{III.85})$$

$$P_{C2} = 0 \quad \text{et} \quad P_{C3} = 0$$

III.1.6.3.d Expression de la puissance réactive absorbée par la charge

$$\begin{cases}
 Q_C = V_C I_C \sin \varphi \\
 V_C = \frac{Z_C E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \\
 I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}
 \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_C = \frac{Z_C E^2}{Z_{Leq}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \sin \varphi \dots \dots \dots (\text{III.86})$$

III.1.6.3.e Expression de la puissance active maximale absorbée par la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge.

Le maximum de puissance est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à l'impédance équivalente de la ligne ($Z_C = Z_{Leq}$) [ANNEXE (I.9.2)] :

$$\Rightarrow P_C \max = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1+\cos(\theta-\varphi)]} \cos\varphi \dots\dots\dots(III.87)$$

III.1.6.3.f Expression de la puissance réactive maximale absorbée par la charge

C'est la même procédure que pour la puissance active, [ANNEXE (I.9.3)] d'où l'expression ci-dessous:

$$Q_C \max = \frac{E^2}{2Z_{Leq}[1+\cos(\theta-\varphi)]} \sin\varphi \dots\dots\dots(III.88)$$

III.1.6.3.g Expression du courant critique

Au moment où la puissance atteint son maximum, le courant enregistré en ce point est appelé courant critique [ANNEXE (I.9.4)]:

L'expression donnant le courant critique noté $I_{C \text{ crit}}$ est :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{Z_{Leq}[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots(III.89)$$

III.1.4.3.h Expression de la tension critique

Comme pour le courant, la tension critique est atteinte lorsque $Z_C=Z_{Leq}$. En remplaçant donc Z_C par Z_{Leq} dans l'équation (III.80), on obtient l'expression [ANNEXE (I.9.5)] suivante:

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{[2(1+\cos(\theta-\varphi))]} \dots\dots\dots(III.90)$$

D'après les équations [(III.55),..., (III.68)] relatives à la première phase, [(III.69),..., (III.80)] relatives à la seconde phase, et [(III.81),..., (III.90)] pour la troisième phase considérée. On constate que les grandeurs électriques ainsi que leurs valeurs maximales et critiques, dépendent toutes des mêmes paramètres que pour les deux précédents phénomènes étudiés (tension de la source, l'impédance du réseau de transmission, et du facteur de puissance).

III.2 Simulation numérique

III.2.1 Processus de la stabilité en tension

A l'aide des équations **(III.7)**,..., **(III.10)**, et en utilisant le programme informatique qu'on a développé en langage de programmation « **fortran** », et dont l'organigramme est donné en **[ANNEXE II.1 (N°1)]**.

On a illustré graphiquement l'évolution du courant circulant à travers la charge, de la tension réceptrice et des puissances active et réactive transmises à la charge en fonction de la variation de l'admittance de cette dernière, puis l'évolution de la tension réceptrice en fonction respectivement de la puissance active, et de la puissance réactive absorbées par la charge.

L'état initial est caractérisé par un fonctionnement à vide dont les valeurs sont les suivantes :

- **$V_c = E$**
- **$I_c = 0$**
- **$P_c = 0$**
- **$Q_c = 0$**

On a également considéré l'influence de trois paramètres sur le processus de la stabilité en tension :

- Pour une tension de la source variable,
- Pour une impédance de la ligne variable,
- Pour un facteur de puissance variable (**à retard et à avance de phase**).

III.2.1.1 Résultats et interprétations

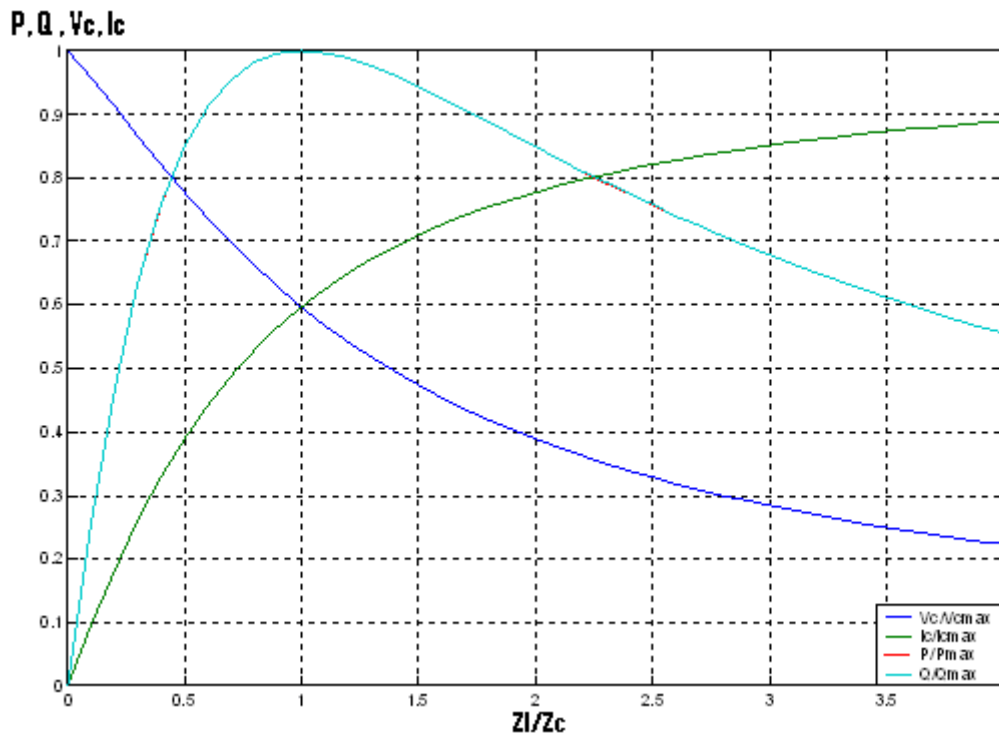


Fig.III.14 Représentation graphique des puissances active et réactive, de la tension et du courant en fonction de la variation de la charge.

ligne impédante :
 $I_{c\max}=2.19$ A
 $V_{c\max}=220$ V
 $P_{\max}=162.79$ W
 $Q_{\max}=53.50$ VAr
 $I_{c\text{crit}}=1.30$ A
 $V_{c\text{crit}}=131.23$ V

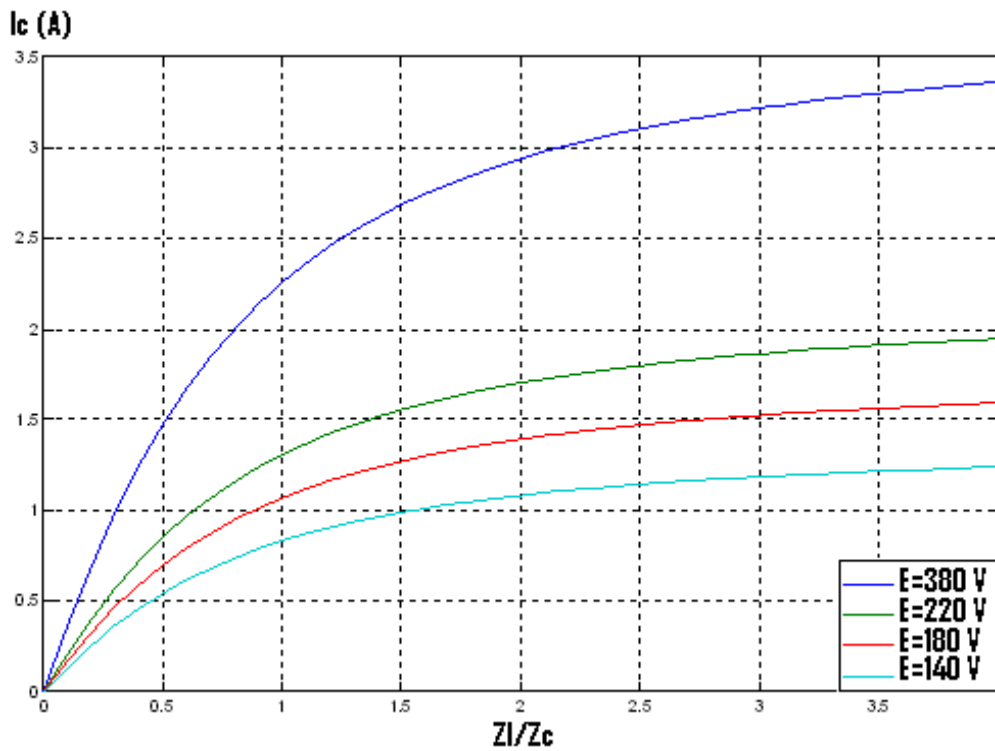


Fig. III.15 Représentation graphique du courant circulant à travers la charge en fonction de la variation de charge, avec la tension de source variable.

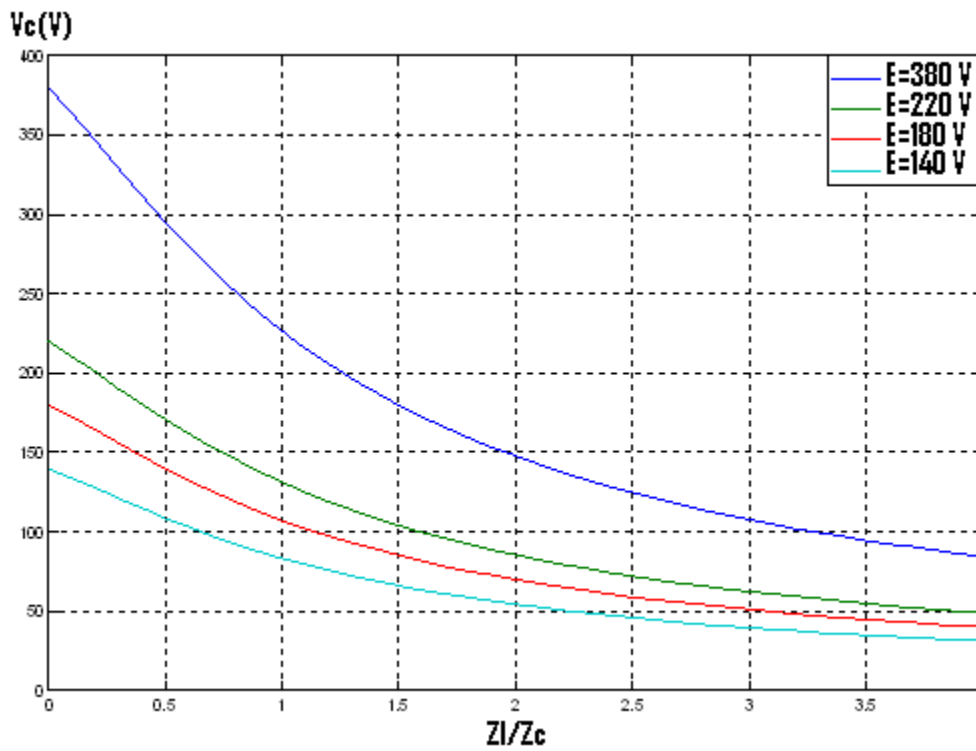


Fig.III.16 Représentation graphique de la tension réceptrice au niveau de la charge en fonction de la variation de la charge, avec la tension de source variable

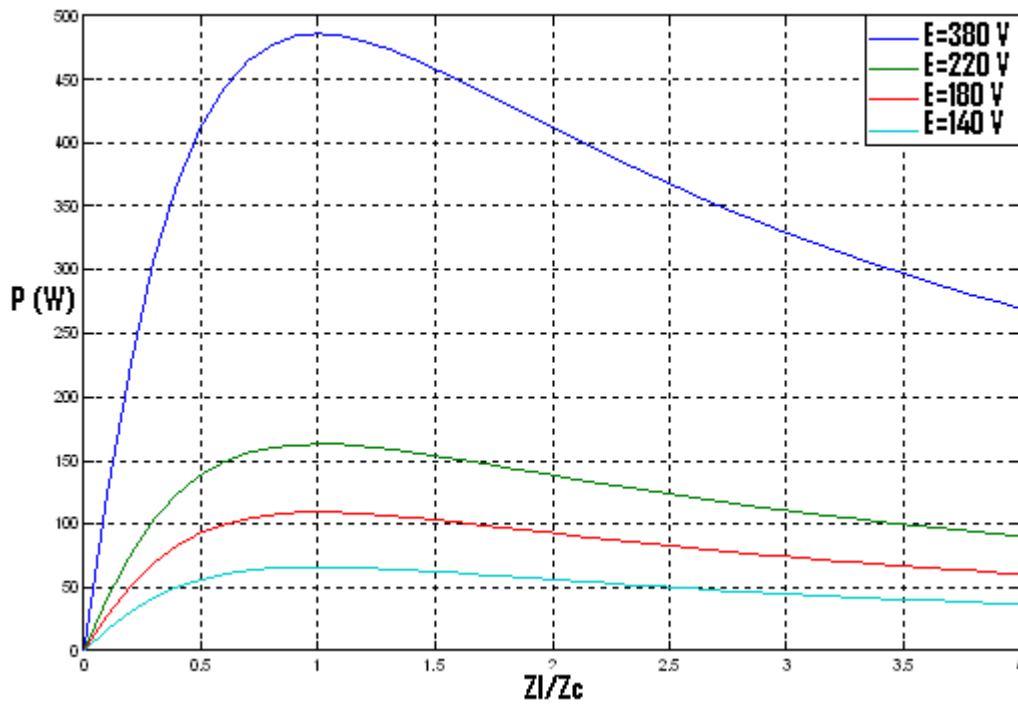


Fig.III.17 Représentation graphique de la puissance active transmise en fonction de la variation de la charge, avec la tension de source variable.

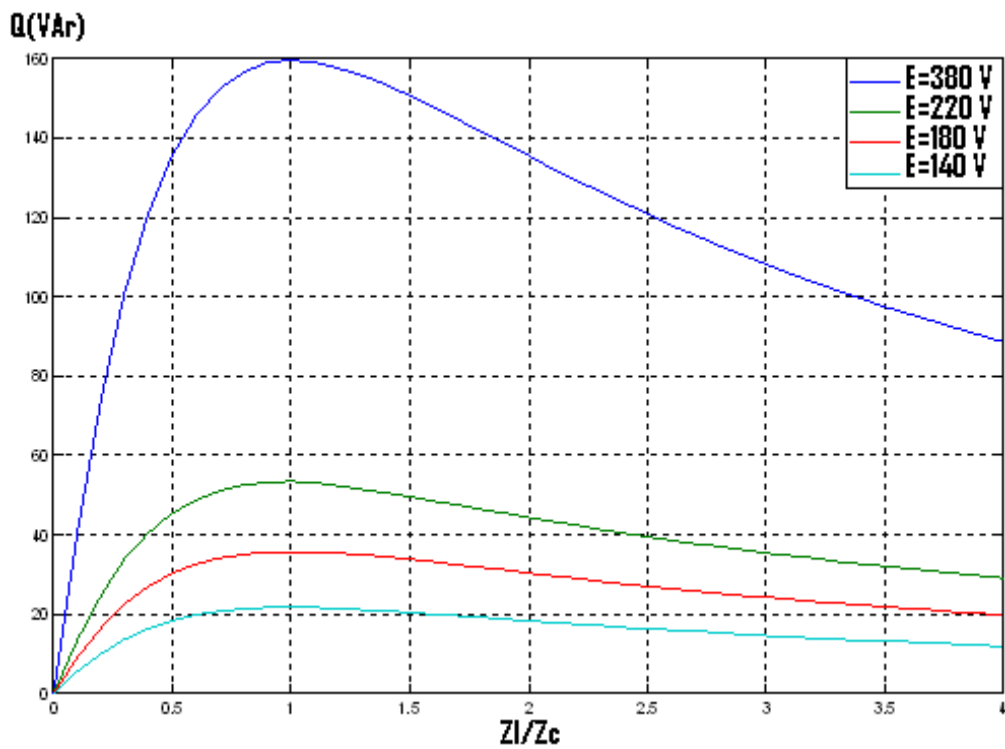


Fig.III.18 Représentation graphique de la puissance réactive transmise en fonction de la variation de la charge, avec la tension de source variable.

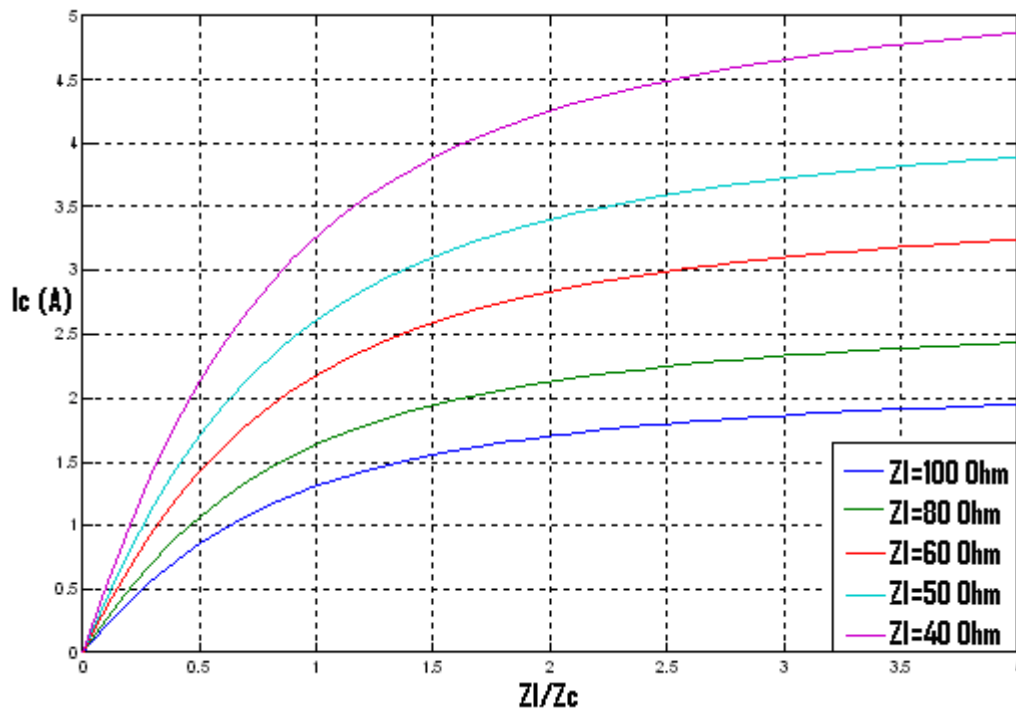


Fig.III.19 Représentation graphique du courant circulant à travers la charge en fonction de la variation de la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

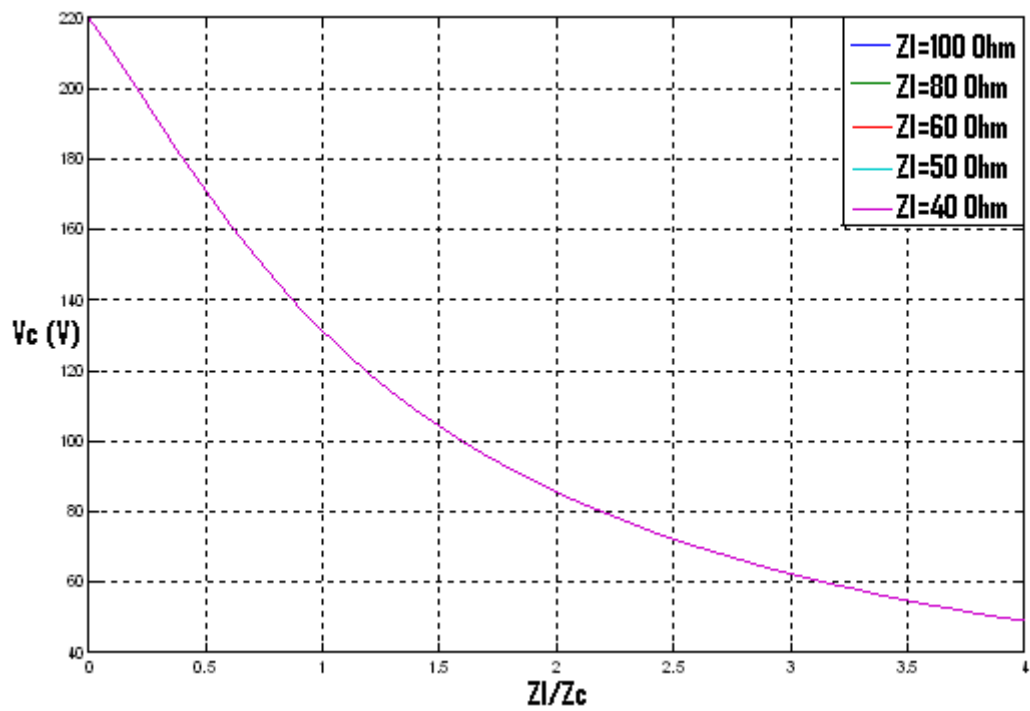


Fig.III.20 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la variation de la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

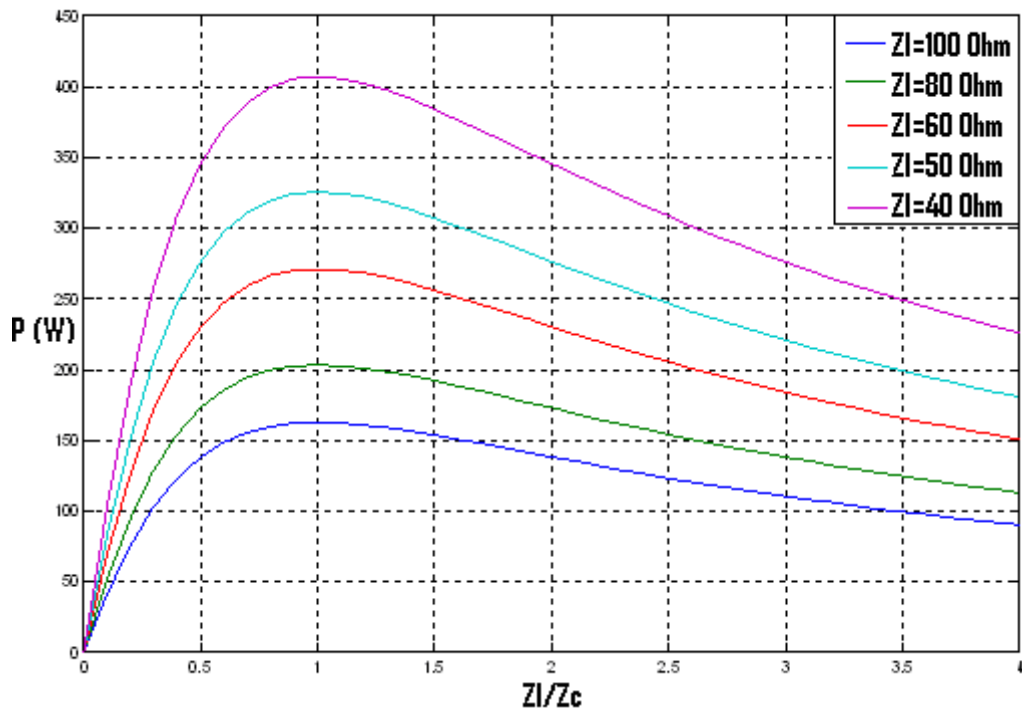


Fig.III.21 Représentation graphique de la puissance active transmise à la charge en fonction de la variation de la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

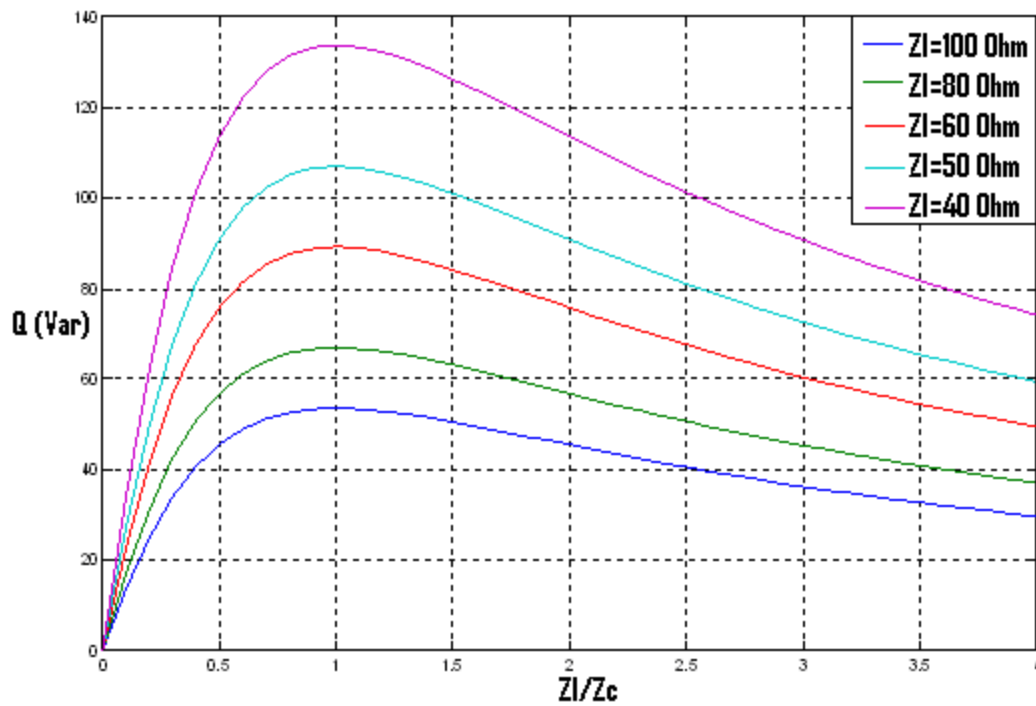


Fig.III.22 Représentation graphique de la puissance réactive transmise à la charge, en fonction de la variation de la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

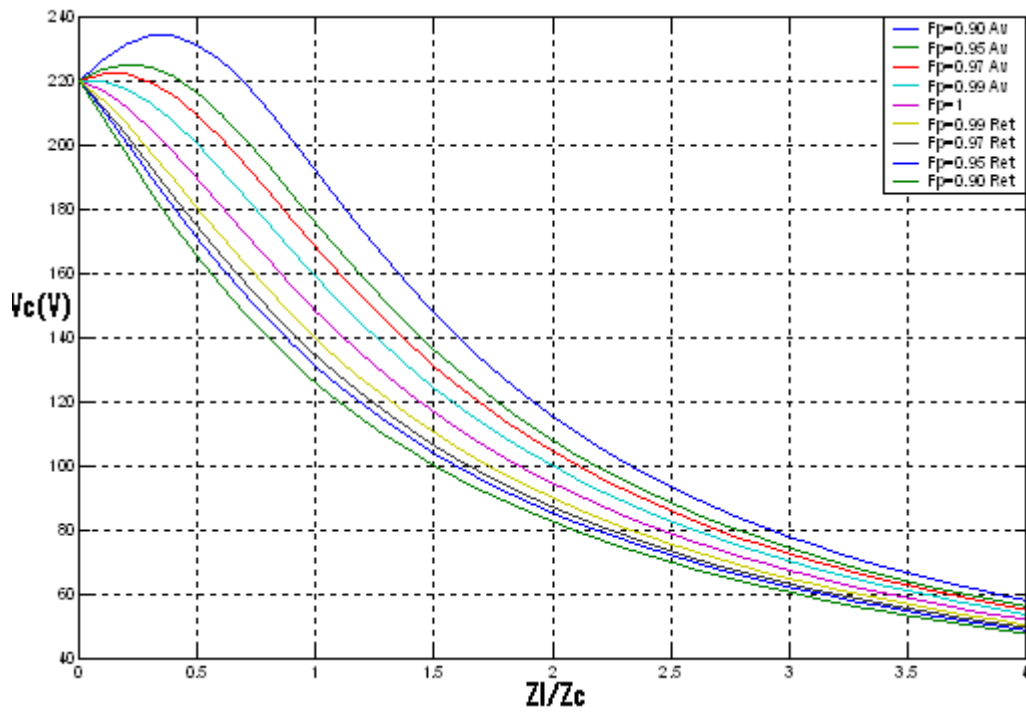


Fig.III.23 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la variation de la charge, avec le facteur de puissance variable.

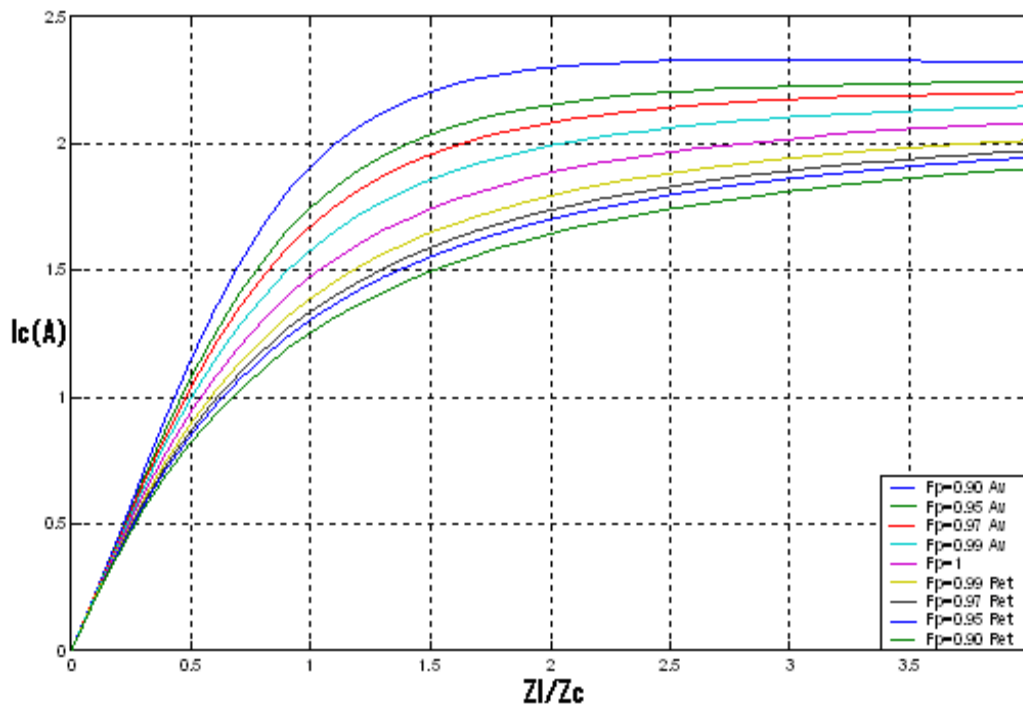


Fig.III.24 Représentation graphique du courant circulant à travers la charge, en fonction de la variation de la charge, avec le facteur de puissance variable.

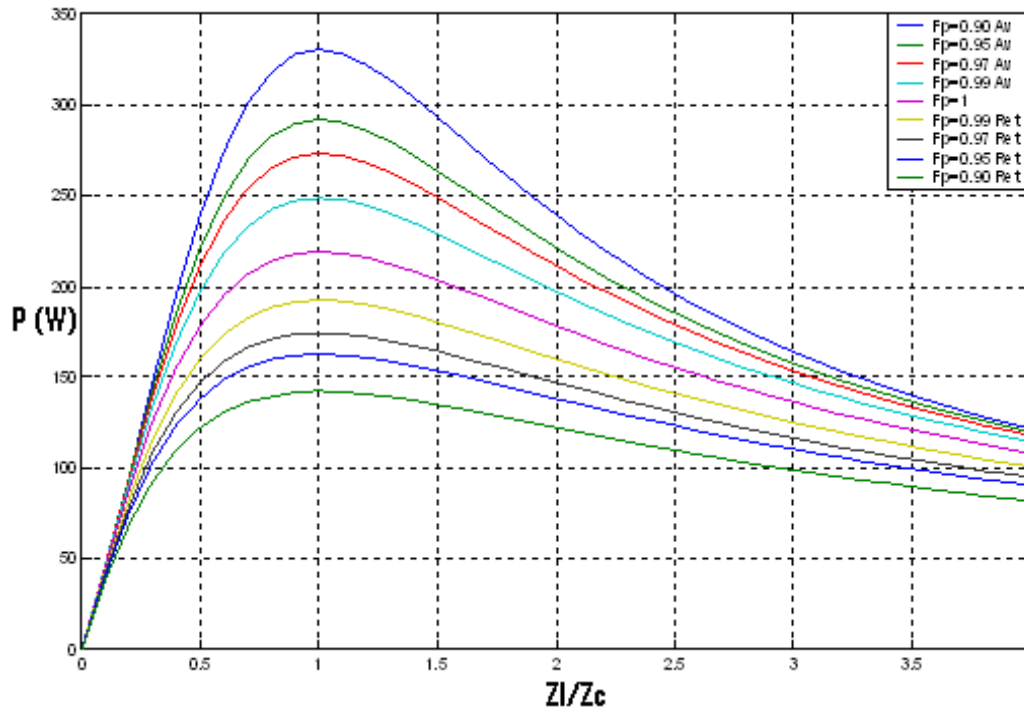


Fig.III.25 Représentation graphique de la puissance active transmise à la charge en fonction de la variation de la charge, avec le facteur de puissance variable.

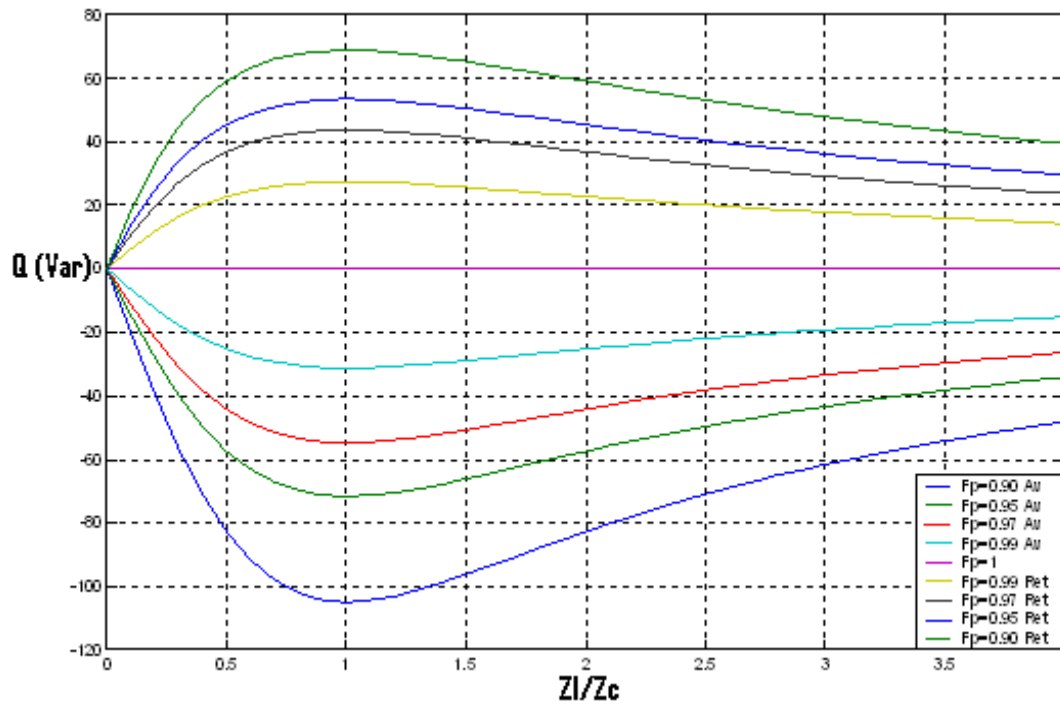


Fig.III.26 Représentation graphique de la puissance réactive transmise à la charge en fonction de la variation de la charge, avec le facteur de puissance variable.

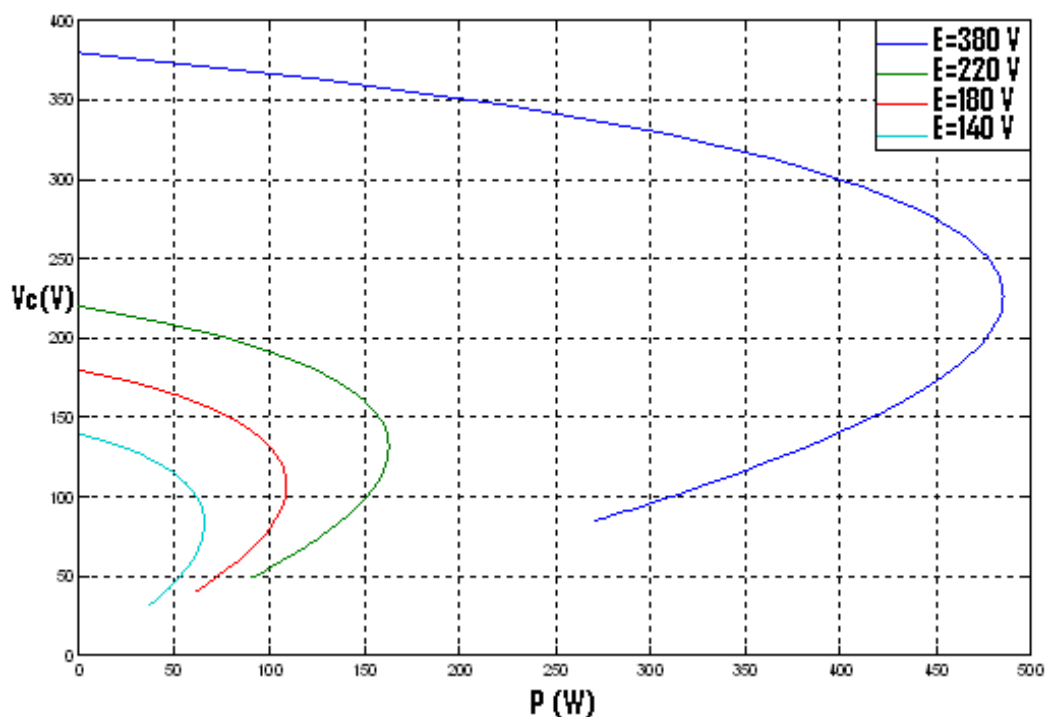


Fig.III.27 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance active transmise à la charge, avec la tension de source variable.

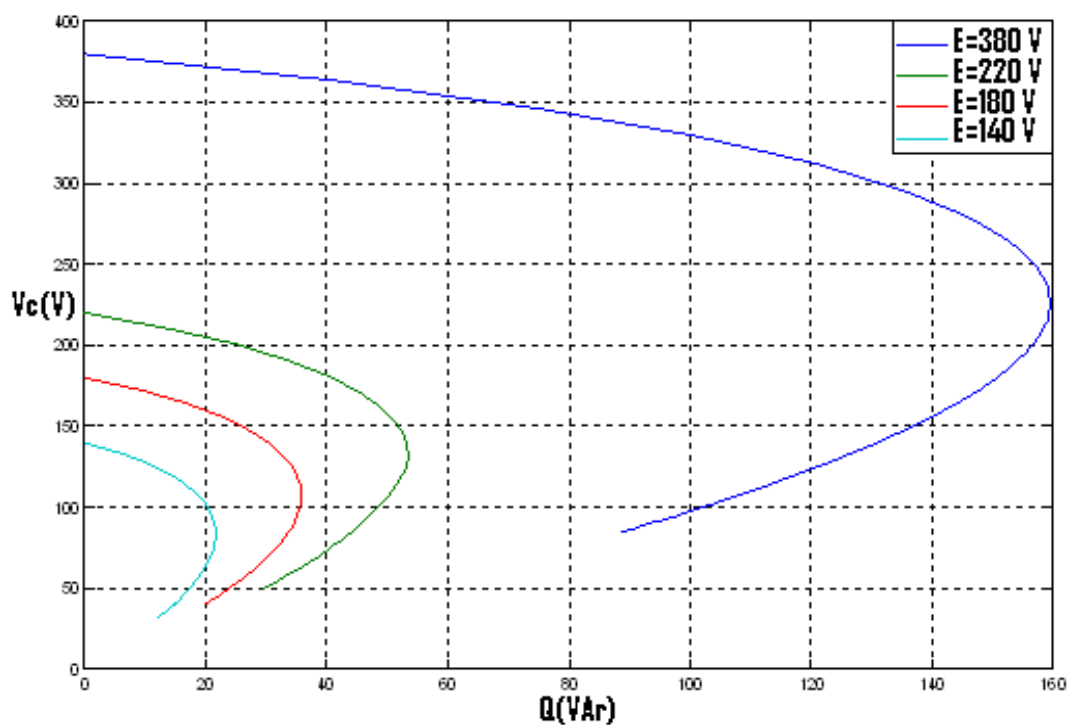


Fig.III.28 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance réactive transmise à la charge, avec la tension de source variable.

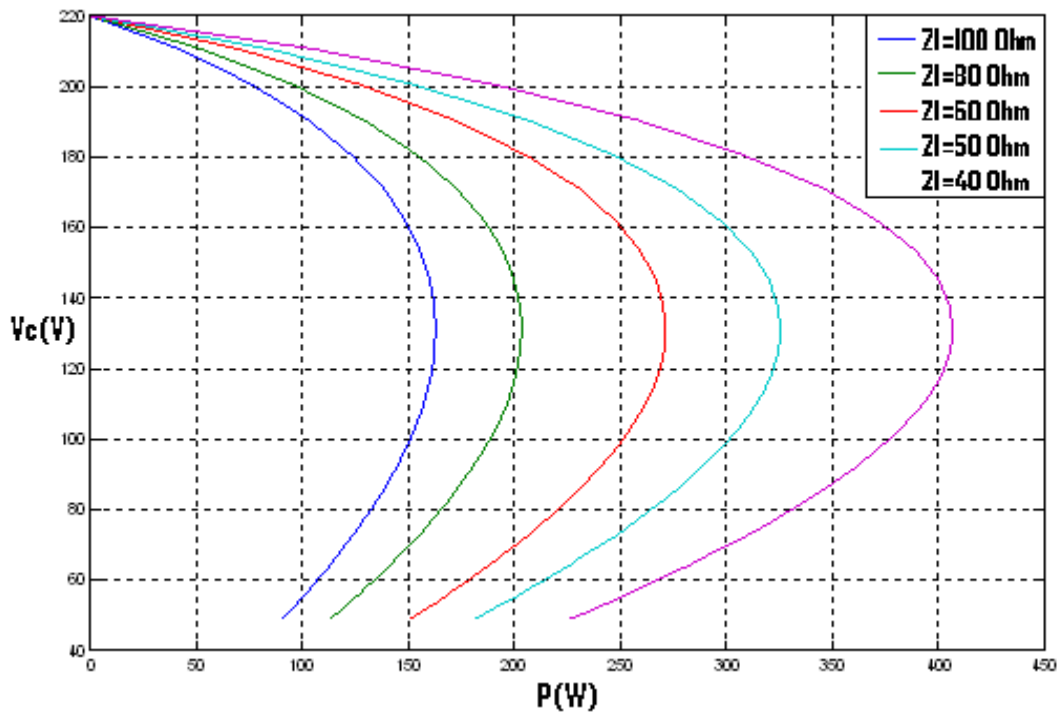


Fig.III.29 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance active transmise à la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

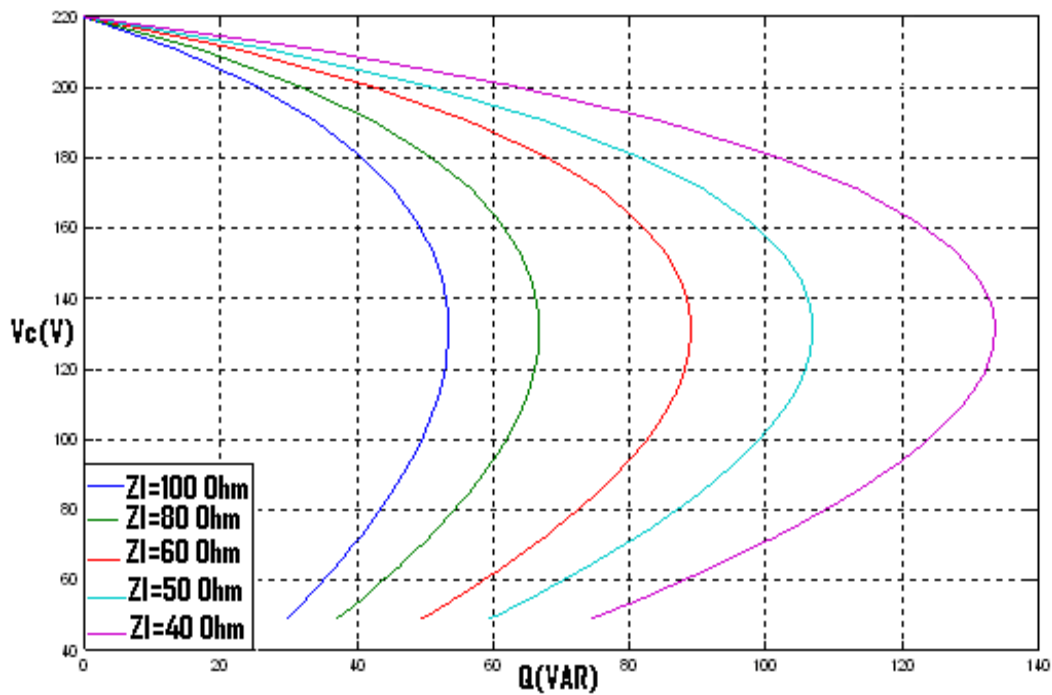


Fig.III.30 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance réactive transmise à la charge, avec l'impédance de la ligne variable.

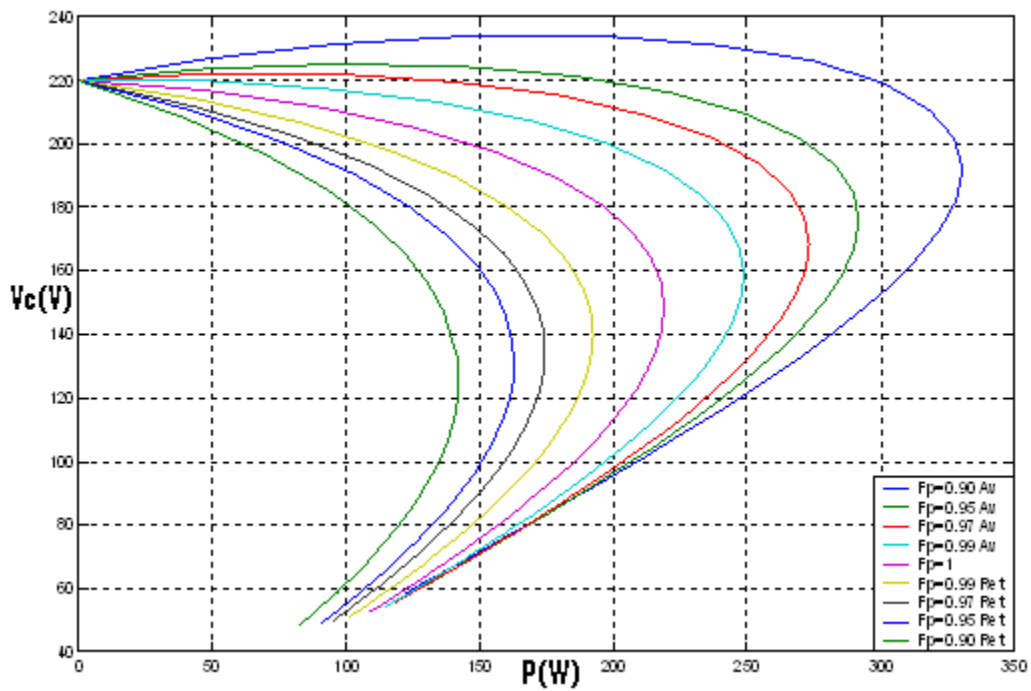


Fig III.31 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance active transmise à la charge, avec le facteur de puissance variable.

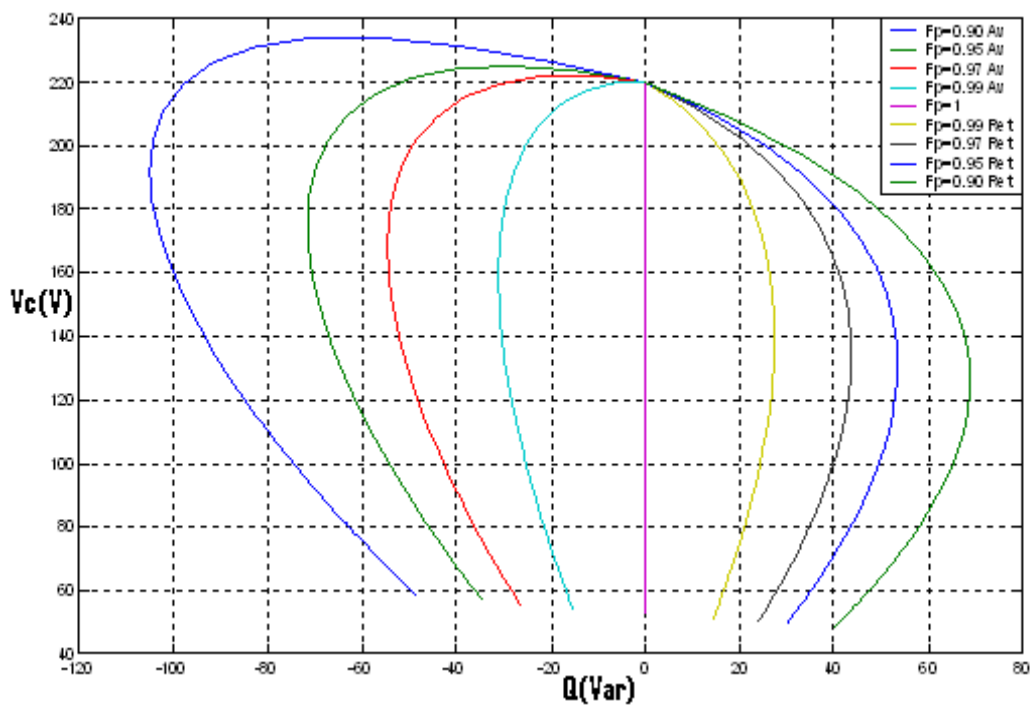


Fig III.32 Représentation graphique de la tension réceptrice en fonction de la puissance réactive transmise à la charge, avec le facteur de puissance variable.

La figure **(III.14)** montre les évolutions du courant circulant à travers la charge, de la tension à ses bornes, et des puissances active et réactive transmises à la charge considérée. On remarque que les puissances active et réactive transmises, et le courant augmentent de manière progressive avec la diminution de l'impédance de la charge donc l'augmentation de la charge conformément aux équations **(III.7)**, **(III.9)**, et **(III.10)**, par contre la tension réceptrice décroît [équation **(III.8)**]. Cependant, les puissances active et réactive finissent par atteindre leurs valeurs maximales notées **Pmax** et **Qmax**, pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne (**Zc=Zl**).

Au-delà de cette valeur, les puissances active et réactive diminuent de plus en plus malgré le fort appel de la charge qui se traduit par une élévation importante du courant, mais insuffisante pour compenser l'importante chute de tension dans le produit (**Vc*Ic**).

On peut aisément déduire qu'il est impossible de transmettre de la puissance de manière continue à partir d'une source de tension constante à la demande de la charge traitée [2] [33].

Il existe donc des puissances maximales active et réactive qui peuvent être transmises à la charge, et qui ne peuvent pas être dépassées.

La même figure montre que pour des puissances active et réactive délivrées à la charge et dont les valeurs sont inférieures à celles de **Pmax** et de **Qmax**, deux situations distinctes se présentent;

- Une première situation où la tension réceptrice a une valeur proche de celle de la source, cette situation correspond au fonctionnement normal du circuit considéré, et elle se situe sur la partie gauche de l'axe vertical passant par le point critique qui correspond aux puissances active et réactive maximales, **cette zone est caractérisée par la stabilité en tension.**
- La seconde situation est celle où le circuit considéré est en fonctionnement anormal, elle se situe sur la portion à droite du point critique, à l'intérieur de cette zone le courant est très élevé, alors que la tension est beaucoup trop basse, cela entraîne un niveau de puissance de plus en plus bas, **cette zone est donc caractérisée par l'instabilité en tension.**

On peut conclure, qu'il existe donc une puissance limite qui doit être respectée, pour assurer le fonctionnement normal ou dans le cas contraire apporter des solutions pour éviter le phénomène d'écroulement de la tension.

Les allures obtenues sur les figures **[(III.15),...(III.18)]** montrent que pour une tension de la source variable, la tension aux bornes de la charge, le courant circulant à travers cette dernière et

les puissances active et réactive transmises augmentent avec l'augmentation de la tension de la source.

Pour le cas où l'impédance de la ligne est variable, **les puissances active et réactive transmises à la charge via le circuit considéré augmentent avec la diminution de l'impédance de la ligne**, c'est pareil pour le courant appelé par la charge, par contre la tension aux bornes de la charge reste inchangée pour tous les cas considérés, comme cela est illustré sur les figures [(III.19),...(III.22)].

Pour un facteur de puissance variable (en avance et en retard de phase), la puissance active transmise à la charge augmente avec l'augmentation du facteur de puissance, c'est pareil pour la tension réceptrice et pour le courant circulant à travers la charge traitée, comme le montre les figures [(III.23),...(III.25)].

Par contre la puissance réactive décroît pour un facteur de puissance en retard de phase et augmente pour un facteur de puissance en avance de phase, ceci est illustré sur la figure (III.26).

Par ailleurs les puissances active et réactive augmentent progressivement jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales lorsque l'impédance de la charge (**Zc**) est égale à celle de la ligne (**Zl**), pour ensuite décroître.

Le phénomène de la stabilité en tension peut aussi être évalué sur les figures [(III.27),...(III.32)], ces allures montrent l'évolution de la tension réceptrice en fonction de la puissance active et réactive transmises à la charge pour tous les cas considérés.

Ces allures montrent que la tension réceptrice diminue de manière progressive, par contre les puissances active et réactive augmentent graduellement jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales pour ensuite diminuer, **à ces valeurs maximales correspond une tension critique notée V_{crit} , au-delà de laquelle le fonctionnement normal n'est plus assuré et devient instable en tension.**

On distingue deux parties pour chaque allure ; une partie supérieure à l'axe horizontal passant par la tension critique correspondant au **fonctionnement stable**, et une partie inférieure au précédent axe caractérisée par **le fonctionnement instable en tension**.

Les figures [(III.27) et (III.28)] montrent que **l'augmentation de la tension de la source E engendre l'augmentation des puissances active et réactive maximales transmises à la charge**, ainsi que l'augmentation de la valeur de la tension critique. Cependant l'augmentation de la tension de la

source doit se faire avec le respect des limites prédéfinies dans le but d'éviter les phénomènes de surtension qui provoquent aussi l'instabilité en tension.

Les figures [(III.29) et (III.30)] montrent qu'avec une impédance de la ligne variable la tension réceptrice reste inchangée pour tous les cas traités, **ce qui signifie que la variation de l'impédance de la ligne n'influence pas la tension aux bornes de la charge, par contre les puissances transmises diminuent avec l'augmentation de l'impédance de la ligne**, et inversement.

Les figures [(III.31) et (III.32)] montrent que **pour un facteur de puissance à retard de phase, la charge est compensée et les puissances active et réactive maximales transmises augmentent, alors que pour un facteur de puissance en avance de phase, il y'a surcompensation de la puissance réactive**, due à l'injection de la puissance réactive qui l'emporte sur les pertes engendrées par le transport de la puissance active. Ce qui engendre une hausse de la puissance active consommée par la charge, et même l'augmentation de la tension réceptrice au-delà de la tension de source.

III.2.1.2 Conclusion

Après la mise en équations des différentes grandeurs électriques qui sont, le courant, la tension, et les puissances active et réactive, et l'obtention de différents résultats illustrant l'évolution de ces grandeurs en faisant varier la charge, on conclut que :

Bien que pour tous les cas considérés les représentations graphiques présentent les mêmes formes, **la limite de la stabilité en tension dans tous les cas étudiés correspond à l'existence d'une puissance maximale transmissible de la source de tension vers la charge traitée via la ligne de transport**, cette puissance maximale varie d'un cas à l'autre selon les trois paramètres considérés lors des essais, et constituent **une limite qu'on ne peut pas transgresser**, elle dépend donc de;

- **La tension de la source dont l'augmentation engendre la hausse de cette puissance maximale transmissible.**
- **L'impédance de la ligne à travers laquelle la puissance transite, et dont la diminution engendre l'augmentation de cette puissance maximale transmissible.**
- **Du facteur de puissance de la charge $\cos(\varphi)$, pour lequel toute augmentation entraîne l'augmentation de la puissance acheminée vers la charge.**

L'élévation du facteur de puissance constitue donc ce qu'on appelle communément la **compensation voire la surcompensation** (selon le cas) de l'énergie réactive, ce type de procédés engendre donc la hausse du niveau de la puissance acheminée vers la charge, et inversement. Ce

procédé s'avère donc très performant pour le maintien et le renforcement de la stabilité en tension des lignes fortement chargées d'un réseau de puissance, l'aptitude de transporter de grandes puissances est augmentée sans pour autant nuire ou dégrader la stabilité en tension d'un système électrique.

Si on veut garantir le fonctionnement normal d'un réseau d'énergie caractérisé par la stabilité en tension, **la limite que constitue la puissance maximale transmissible est à respecter, et à ne pas transgresser.**

Au-delà de cette limite, **le fonctionnement devient instable en tension**, à ce moment des solutions doivent être formulées pour éviter, voire contenir les situations critiques, et extrêmes d'écroulements de tension, des solutions préventives ou curatives (selon les circonstances) telles que celles mentionnées au **chapitre (II)**. On assimile ainsi la raison pour laquelle un contrôle approprié de la tension dans un système électrique est impératif et vital.

Pour chacun des cas traités et malgré l'apport en puissance dû à l'introduction des moyens de réglage de la tension, **il existe toujours une puissance maximale au-delà de laquelle, il devient impossible de transmettre de l'énergie au réseau récepteur.** A partir de là, on retrouve le concept électrotechnique bien connu : **Il existe une valeur maximale de puissance active délivrée à une charge à travers une ligne de transport, à partir d'une source de tension constante [1].**

D'après les résultats on peut conclure que **régler la tension revient donc à limiter les transits d'énergie réactive**, la tension et l'énergie réactive étant deux grandeurs étroitement liées.

On peut conclure également que **plus la tension d'exploitation est élevée, plus la puissance maximale transmissible à la charge est élevée. On en déduit qu'il est important d'exploiter le réseau avec un plan de tension le plus haut possible**

Plus le déphasage (φ) diminue, c'est-à-dire **plus la compensation de la charge augmente (grâce à l'introduction de condensateurs), plus la puissance maximale croît.** D'où l'intérêt de compenser (voire de surcompenser) au maximum au plus près des charges, la puissance réactive qu'elles consomment. La stabilité en tension est dégradée lorsque la tension d'exploitation est faible, et quand la charge est insuffisamment compensée.

L'instabilité en tension dans un réseau d'énergie électrique résulte de la tentative de ce dernier de vouloir fonctionner au-delà de sa puissance maximale délivrable.

III.2.2 Phénomène de la perte de synchronisme

A l'aide des équations [(III.15),..., (III.18)], [(III.23),..., (III.26)], [(III.31),..., (III.34)], [(III.39),..., (III.42)], [(III.47),..., (III.50)], et en utilisant les programmes informatiques que l'on a développé en langage de programmation « fortran », et dont les organigrammes sont donnés en [ANNEXE II.2 (N°2),..., (N°6)] et en considérant l'équation (III.3).

On a illustrer graphiquement dans une première étape l'évolution des grandeurs électriques qui sont : le courant, la tension réceptrice, et les puissances active et réactive absorbées par la charge en fonction de la variation de l'admittance de cette dernière [Figure (III.33)], cela pour montrer la forte corrélation entre le processus de la stabilité en tension et le phénomène de la rupture de synchronisme. Puis lors d'une seconde étape, on a illustré graphiquement l'évolution de la puissance active transitée à la charge en fonction de l'angle interne (δ). Dans le but de mettre en évidence le phénomène de la perte de synchronisme. Cela pour les différents circuits considérés dans la première partie de ce chapitre.

L'état initial pour tous les cas considérés est caractérisé par un fonctionnement à vide dont les valeurs sont les suivantes :

- $V_c = E$
- $I_c = 0$
- $P_c = 0$
- $Q_c = 0$

On a considéré l'influence de deux paramètres sur le phénomène de la rupture de synchronisme:

- Pour la tension de la source E variable,
- Pour la réactance inductive de la ligne X_l variable.

III.2.2.1 Résultats et interprétations

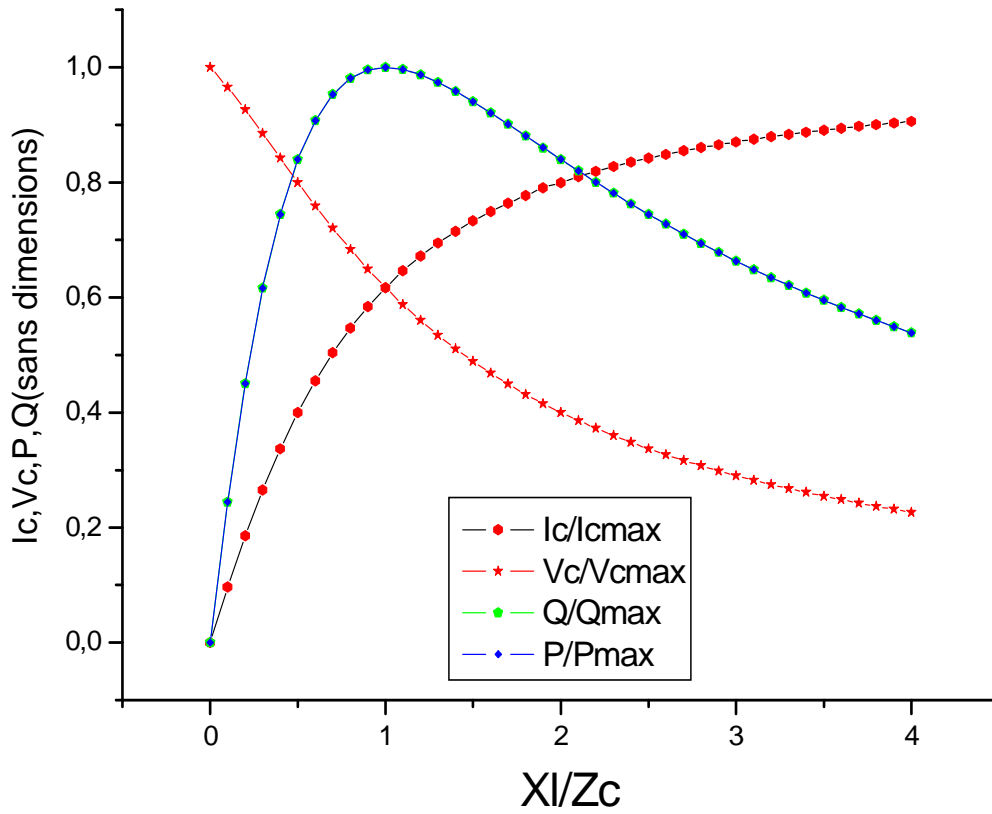


Fig.III.33 Puissances active et réactive, courant de charge et tension réceptrice en fonction de la variation de la charge.

ligne inductive :
 $I_{cmax}=2.26 \text{ A}$
 $V_{cmax}=220 \text{ V}$
 $P_{max}=175.19 \text{ W}$
 $Q_{max}=57.58 \text{ VAR}$
 $I_{ccrit}=1.36 \text{ A}$
 $V_{ccrit}=135.80 \text{ V}$

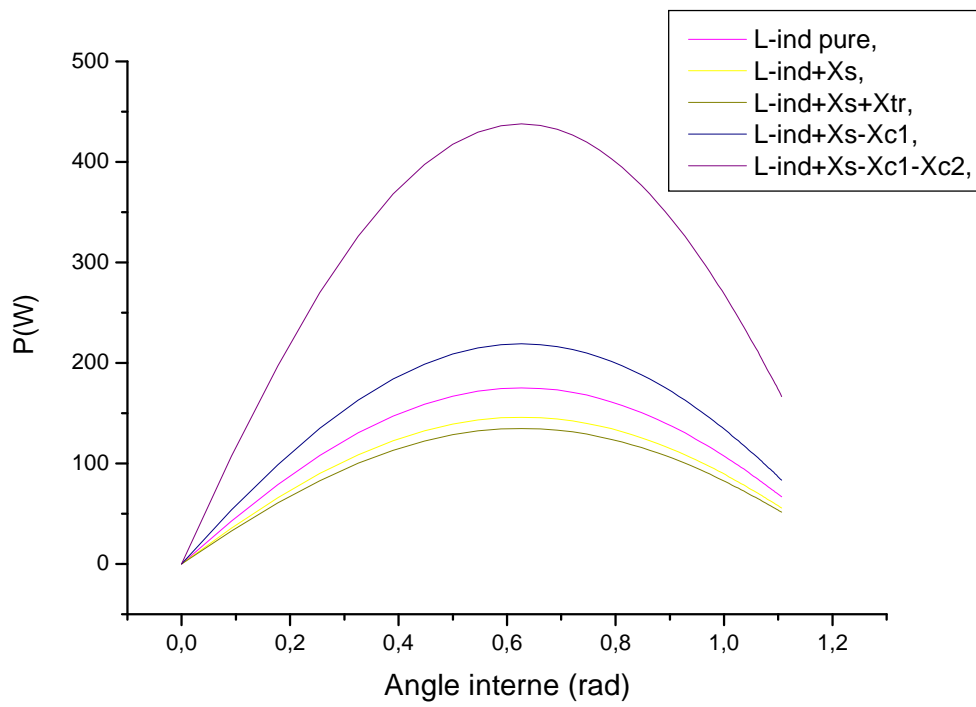


Fig.III.34 Représentation graphique de la puissance active en fonction de l'angle interne, pour les différents cas considérés.

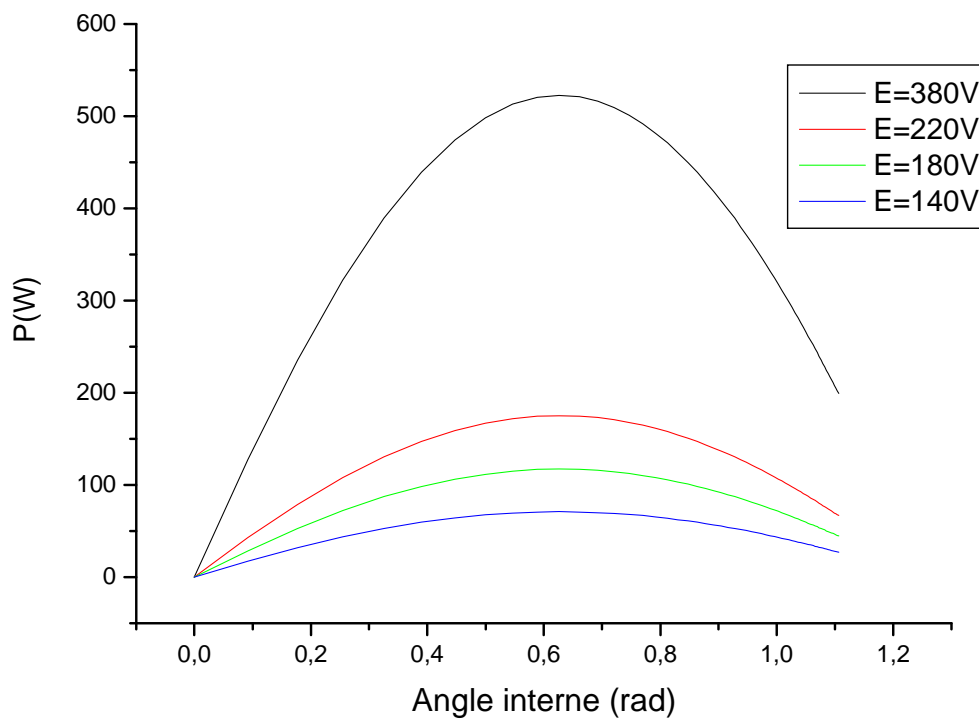


Fig.III.35 Représentation graphique de la puissance active en fonction de la variation de l'angle interne, pour le cas d'une ligne inductive, avec la tension de la source variable.

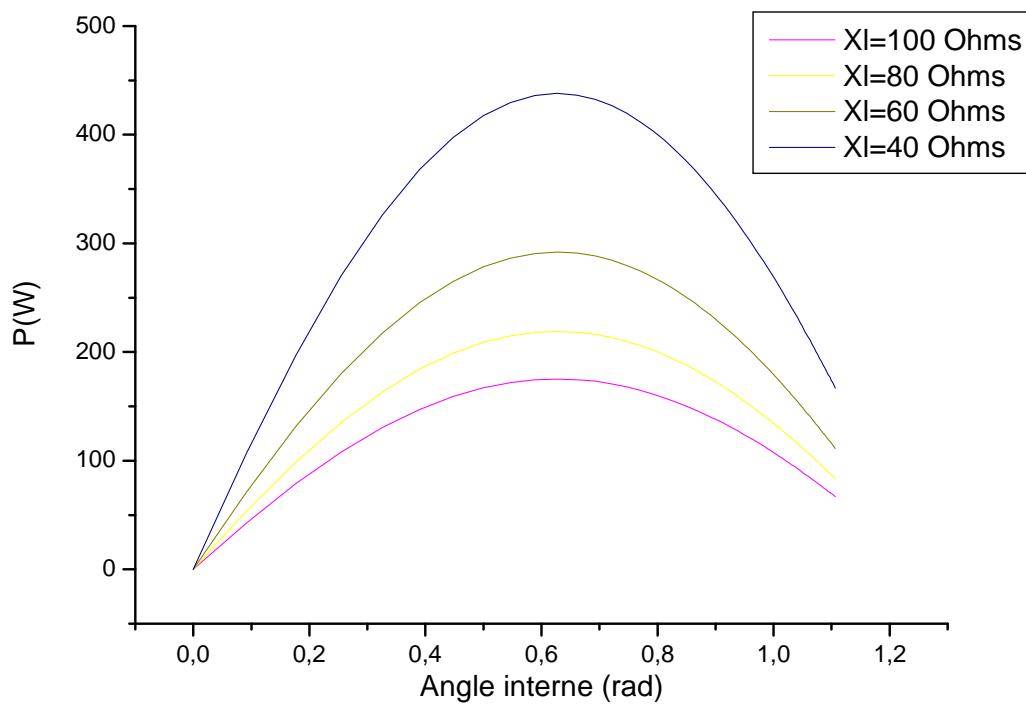


Fig.III.36 Représentation graphique de la puissance active en fonction de la variation de l'angle interne, pour le cas d'une ligne inductive, avec la réactance de la ligne variable.

Pour la mise en évidence du phénomène de la rupture de synchronisme, on utilise un circuit de base semblable à celui utilisé pour l'étude du processus de la stabilité en tension, mis à part le fait qu'on néglige la résistance de la ligne de transmission devant la réactance de cette dernière (la réactance d'une ligne THT ou HT étant dix fois supérieure à la valeur de sa résistance).

Après la mise en équations des grandeurs électriques considérées, et l'obtention de différents résultats, on constate que :

La figure **(III.33)** qui illustre l'évolution du courant appelé, de la tension réceptrice, et des puissances active et réactive consommées par la charge en fonction de la variation de cette dernière, présente des allures d'évolution similaires à celles des grandeurs électriques illustrées sur la figure **(III.14)** obtenue lors de la simulation consacrée à la mise en évidence du processus de la stabilité en tension.

Néanmoins, ces mêmes grandeurs électriques, présentent et cela pour les différents points de fonctionnement du circuit considéré, des valeurs différentes, et ceci par rapport au précédent essai traitant de la stabilité en tension, en effet, on constate que les valeurs de toutes les grandeurs électriques obtenues pour le cas traitant de la perte de synchronisme sont augmentées par rapport au précédent cas. Ce fait est dû à l'état (la nature) de la ligne utilisée pour l'étude de chaque cas (ligne impédante pour la mise en évidence du processus de la stabilité en tension et ligne purement inductive pour la rupture de synchronisme), **en négligeant la résistance, les pertes actives sont moindres donc on transporte plus de puissance active à la charge, c'est la raison pour laquelle la puissance maximale est légèrement plus élevée** par rapport au premier cas [Figure **(III.14)**].

Pour tous les autres cas considérés pour l'étude du phénomène de la perte de synchronisme, les allures obtenues sont exactement les mêmes que celles de la figure **(III.33)**. Ces cas sont ; l'utilisation d'une ligne inductive en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur, puis avec introduction de la réactance synchrone de l'alternateur et la réactance inductive du transformateur, le cas où il y'a introduction de la compensation série locale **(Xc1)**, et enfin celui où il y'a compensation série locale et globale **(Xc1, Xc2)**. Cependant les valeurs de ces grandeurs électriques diffèrent selon les cas **du fait du changement de la réactance totale du réseau de transmission**, conséquence directe de l'utilisation de dispositifs différents selon les cas.

Par ailleurs, on constate que deux situations distinctes sont obtenues pour une même puissance transmissible, dont la valeur est inférieure à la valeur de la puissance maximale transmissible :

- Une situation où **le fonctionnement normal est garanti, donc où le système reste stable**, cette situation correspond à la zone délimitée à gauche par un axe vertical passant par le point critique (correspondant à la puissance maximale transmissible).
- L'autre situation correspond à la zone située à droite du précédent axe (Axe de fonctionnement critique), dans cette zone **le fonctionnement est anormal, et caractérisé par une instabilité notable de la tension**.

Les allures des puissances actives délivrées à la charge en fonction de la variation de l'angle interne (δ), pour tous les cas considérés sont données en figure (III.34).

Cette figure montre que **les puissances actives transmises à la charge traitée augmentent de manière progressive avec l'augmentation de l'angle interne (δ)**, pour atteindre leurs valeurs maximales lorsque l'angle interne (δ) atteint un certain angle que l'on notera angle interne critique (δ_{crit}). **C'est l'angle qui correspond en fait à la limite de fonctionnement normal du système considéré, caractérisé par la limite de la stabilité angulaire, donc la limite du fonctionnement au synchronisme du circuit** [32] [34].

Au-delà de cet angle, on constate que les puissances actives transmises vers la charge diminuent de plus en plus avec l'élévation de l'angle interne.

C'est ainsi qu'on distingue deux situations de fonctionnement pour une seule et même puissance active fournie, et dont la valeur est inférieure à la puissance maximale transmise, et cela est valable pour tous les autres cas traités;

- Une situation en deçà de la puissance maximale pour laquelle l'angle (δ) prend des valeurs inférieures à celles de (δ_{crit}), pour cette zone qui se situe à gauche du point critique (correspondant à la puissance maximale transmissible), le réseau producteur est apte à fournir de la puissance active à la demande du réseau récepteur, et **l'angle interne varie de manière similaire avec la puissance consommée par la charge** (dans le même sens).
- Par contre, et pour la seconde situation où tous les points de fonctionnement se situent à droite du précédent point critique, c'est-à-dire à l'intérieur de la zone où on a atteint la limite de la stabilité, du fait que le réseau producteur ne peut plus

transmettre de la puissance à la charge. **L'angle interne (δ) et la puissance active consommée par la charge varient dans des sens opposés ; le concept théorique est donc bien vérifié et le système ne fonctionne plus au synchronisme [32] [34].**

Pour ne pas perdre la faculté de fonctionner au synchronisme, il faut que les grandeurs électriques varient de même manière, autrement dit ; si l'angle interne s'écarte trop de sa position d'équilibre vers l'avant, il faut impérativement que la puissance électrique augmente pour que le système reste stable, dans le cas contraire c'est la rupture de synchronisme.

On constate aussi qu'en mettant en évidence la compensation série (**locale et globale**) par l'introduction de deux condensateurs en série, l'un après la source (**compensation globale**), l'autre avant la charge (**compensation locale**), **la puissance active transmise est plus importante que pour les autres cas considérés.**

Cela est dû aux valeurs des réactances du circuit considéré qui sont différentes d'un cas à un autre étant donné l'utilisation de dispositifs différents. **Plus la réactance totale du circuit diminue, et plus la puissance maximale consommée par la charge augmente, et inversement.**

L'apport positif fourni par la compensation série (**globale et locale**) est clairement mis en évidence, en effet ; **l'introduction de ces dispositifs réduit les réactances des longues lignes de transport, donc les pertes sur les lignes, ce qui fait aussi augmenter les puissances transportées et consommées par la charge.** L'autre avantage est l'apport en énergie réactive par les condensateurs qui équilibrent sensiblement les pertes réactives sur les lignes de transport, et dont les réactances sont à l'origine des plus importantes chutes de tension.

Sur un autre plan, l'effet apporté par l'introduction de ces compensateurs (condensateurs) est analogue à l'augmentation du nombre de liens en parallèle du réseau de transmission, qui a pour avantage le raccourcissement des distances électriques entre les zones productrices et consommatrices solidifiant le lien synchronisant, donc la stabilité du système électrique.

On constate toujours les mêmes résultats que pour l'essai traitant de la stabilité en tension sur le circuit considéré pour ce même cas, et dont les résultats sont exposés sur la figure **(III.21)** qui donne la puissance active transmise en fonction de la variation de la charge, pour une impédance de la ligne **Zl** variable, **d'où encore une fois la forte corrélation existante entre les deux phénomènes.**

Pour le cas où la tension de la source est variable, et où l'on considère uniquement le premier cas (ligne purement inductive), on obtient les allures illustrées en figure (III.35) qui montre l'évolution de la puissance active transmise à la charge en fonction de l'angle interne (δ), à tension de source variable.

Cette figure confirme que **la puissance active acheminée vers le réseau récepteur augmente avec l'élévation du niveau de tension de la source**, ce constat est valable et généralisé à tous les autres cas traités. Mis à part le fait que les valeurs des puissances actives et pour tous les points de fonctionnement changent d'un cas à l'autre, cela pour les mêmes raisons citées lors de l'analyse de la figure (III.34) (variation de la réactance totale du système).

La figure (III.36) montre l'évolution de la puissance active acheminée vers le réseau récepteur en fonction de la variation de l'angle interne (δ) pour le cas où l'on considère la réactance de la ligne variable, dans le but d'observer et d'analyser l'impact de ses variations sur le synchronisme du système de base étudié.

Le constat que l'on tire est clair ; **la puissance active délivrée augmente avec la diminution de la réactance totale du réseau de transmission**, d'ailleurs cette observation est valable pour les autres cas considérés.

La réduction de la valeur de la réactance de la ligne de transport due à l'insertion de dispositifs de compensation fait effectivement augmenter la capacité des lignes en matière de puissance transmissible, et ceci est équivalent à raccourcir la distance électrique entre la production et la consommation, il est cependant utile de rappeler que le même effet est obtenu par l'augmentation du nombre de lignes en parallèle entre la source et la charge.

Tous ces procédés contribuent donc au maintien du synchronisme dans un système d'énergie électrique grâce à la solidification du lien synchronisant. (Tout cela comme si il se produisait un rapprochement entre le lieu de production et celui de la consommation). Les deux cas mis en évidence (tension de source variable, réactance de la ligne de transport variable) en sont la preuve, et l'observation de leurs effets sur l'apport en puissance et le maintien de la stabilité du réseau. Autrement dit **l'augmentation de la limite de la stabilité angulaire du réseau, c'est ce que vérifient bien les équations en puissance active.**

III.2.2.2 Conclusion

Après la mise en équations des grandeurs électriques qui sont ; le courant, la tension, et les puissances actives et réactives, et l'obtention de différents résultats illustrant l'évolution des grandeurs citées en faisant varier la charge (**Fig.III.33**), et puis la puissance active en fonction de l'angle interne (**δ**), on conclut que ;

Bien que pour tous les cas traités, les représentations graphiques présentent les mêmes allures d'évolution, **la limite de fonctionnement synchrone du système correspond pour tous les cas considérés à l'existence d'une puissance maximale transmissible à partir de la source de tension à la charge traitée via la ligne de transmission**, cette puissance maximale comme on a pu le constater varie d'un cas à l'autre selon les paramètres considérés lors des différents essais effectués sur le circuit utilisé, et constitue **une limite qu'on doit respecter si l'on veut garantir le fonctionnement synchrone du système.**

De plus, l'augmentation de la puissance électrique délivrée doit forcément s'accompagner d'une élévation de l'angle interne (δ), dont les glissements importants entraînent la rupture de synchronisme du système.

La diminution de la réactance totale du réseau de transmission induit l'augmentation de la puissance acheminée au réseau récepteur, et inversement.

L'augmentation de la tension de la source entraîne aussi l'augmentation de la puissance transitée vers la charge.

Les procédés tels que **l'insertion de dispositifs de compensation (compensation série locale et globale), où l'augmentation du nombre de lignes de transmission en parallèle contribuent au maintien du synchronisme du système.**

En effet, on conclut que, **le renforcement du système au niveau de ses liaisons est impératif et vital en vue de solidifier le lien synchronisant (couple synchronisant) entre la production (source) et la consommation (charge).**

Le phénomène de rupture de synchronisme est un mécanisme de dégradation assez complexe, et dont les origines sont multiples, très dangereux lors de son apparition sur des réseaux réels, des mesures telles que celles énumérées précédemment sont fortement préconisées pour éviter le développement de cet « incident majeur », le cas échéant et toujours dans un réseau réel, **l'ilotage (débouclage) du réseau en sous réseaux est incontournable pour contenir le phénomène.**

III.2.3 Phénomène des surcharges en cascade

A l'aide des équations [(III.55),(III.59),(III.60),(III.64)], [(III.69),(III.72),(III.73), (III.76)], [(III.81),(III.83),(III.84),(III.86)]. Puis les équations [(III.55),..., (III.58),(III.60),..., (III.63)], [(III.69),..., (III.71),(III.73),..., (III.75)], [(III.81),..., (III.83),(III.85)], et en utilisant le programme informatique qu'on a développé en langage de programmation « **fortran** », et dont l'organigramme est donné en [ANNEXE II.3 (N°7)] :

On a illustré lors d'une première étape graphiquement l'évolution du courant circulant à travers la charge, la tension réceptrice et les puissances active et réactive transmises à la charge en fonction de la variation de l'admittance de cette dernière.

Dans une seconde étape on a illustré l'évolution des puissances actives absorbées par la charge, ainsi que les courants transités vers la charge. Le but étant de mettre en évidence le phénomène des surcharges en cascade.

Pour ce faire, on a considéré un système composé initialement de trois lignes de transmission, et les phases de fonctionnement sont les suivantes :

- La première phase avec trois lignes opérationnelles,
- La seconde phase avec deux lignes de transmission opérationnelles suite à la perte de la ligne **(3)**,
- La troisième phase correspond au fonctionnement avec une seule ligne, suite à la déconnexion simultanée des lignes **(2)** et **(3)**.

Pour chacune des trois phases de fonctionnement, l'état initial est caractérisé par un fonctionnement à vide dont les valeurs sont les suivantes :

- $V_c = E$
- $I_c = 0$
- $P_c = 0$
- $Q_c = 0$

L'effet de report de charge entre les lignes ont été évidemment pris en compte pour les deuxième et troisième phases de fonctionnement.

III.2.3.1 Résultats et interprétations

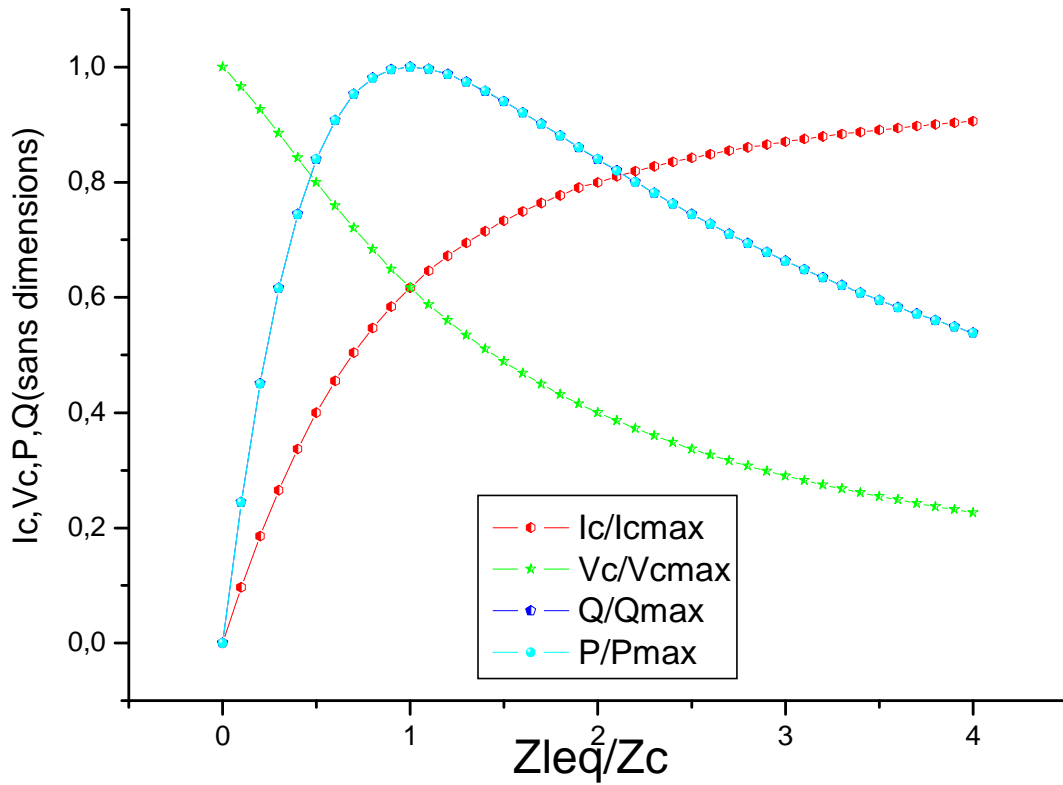


Fig.III.37 Puissances active et réactive, courant de charge et tension réceptrice en fonction de la variation de la charge.

$P_{max} = 1513.40 \text{ W}$
$Q_{max} = 497.43 \text{ VAR}$
$I_{cmax} = 20.42 \text{ A}$
$V_{cmax} = 220 \text{ V}$
$I_{ccrit} = 11.54 \text{ A}$
$V_{ccrit} = 138.05 \text{ V}$

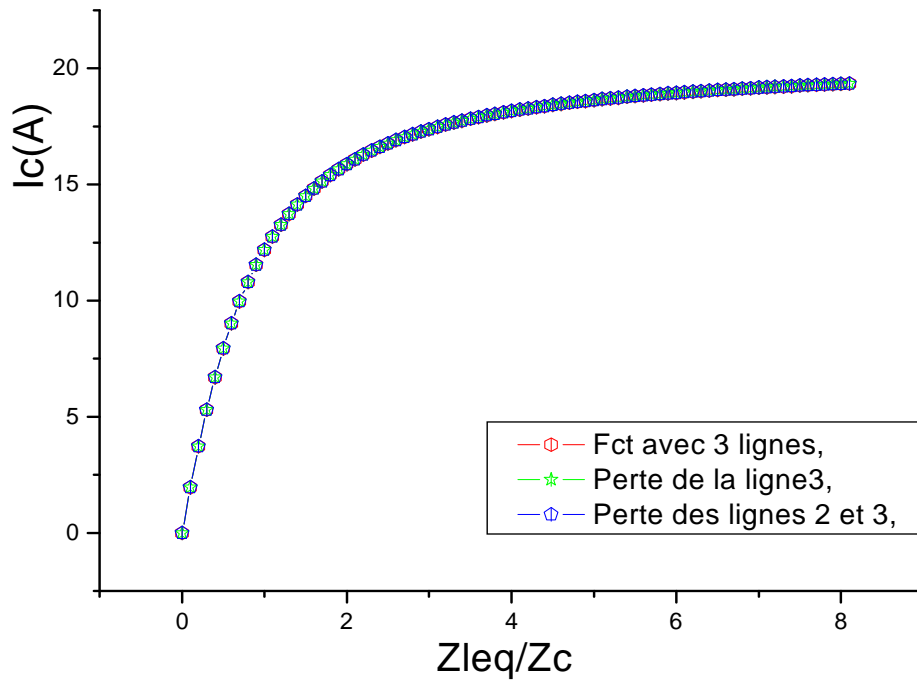


Fig.III.38 Courant total circulant à travers la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour les trois cas considérés.

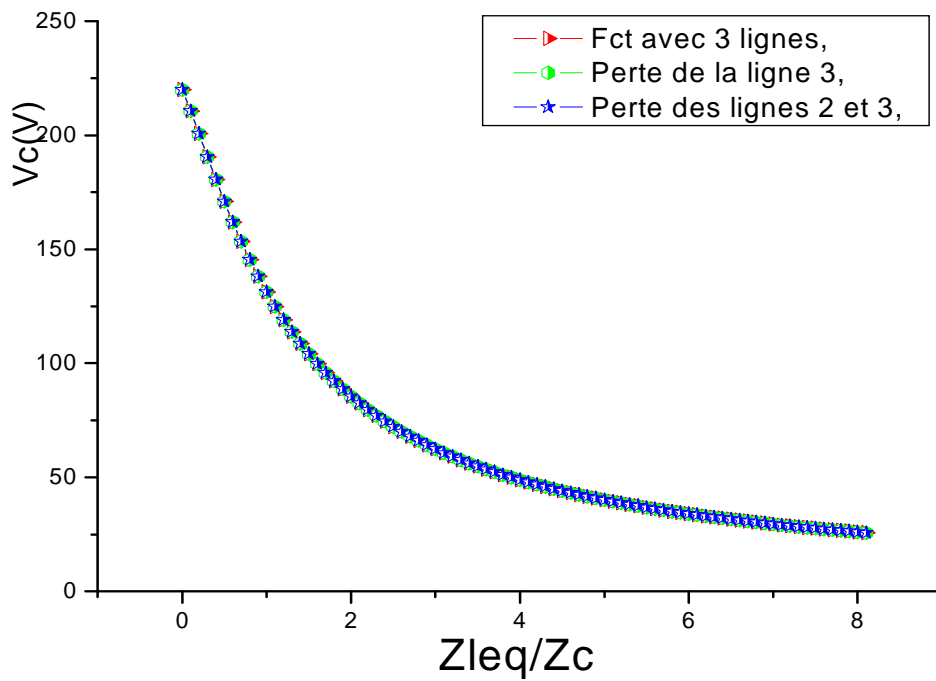


Fig.III.39 Tension réceptrice en fonction de la variation de la charge pour les trois cas considérés.

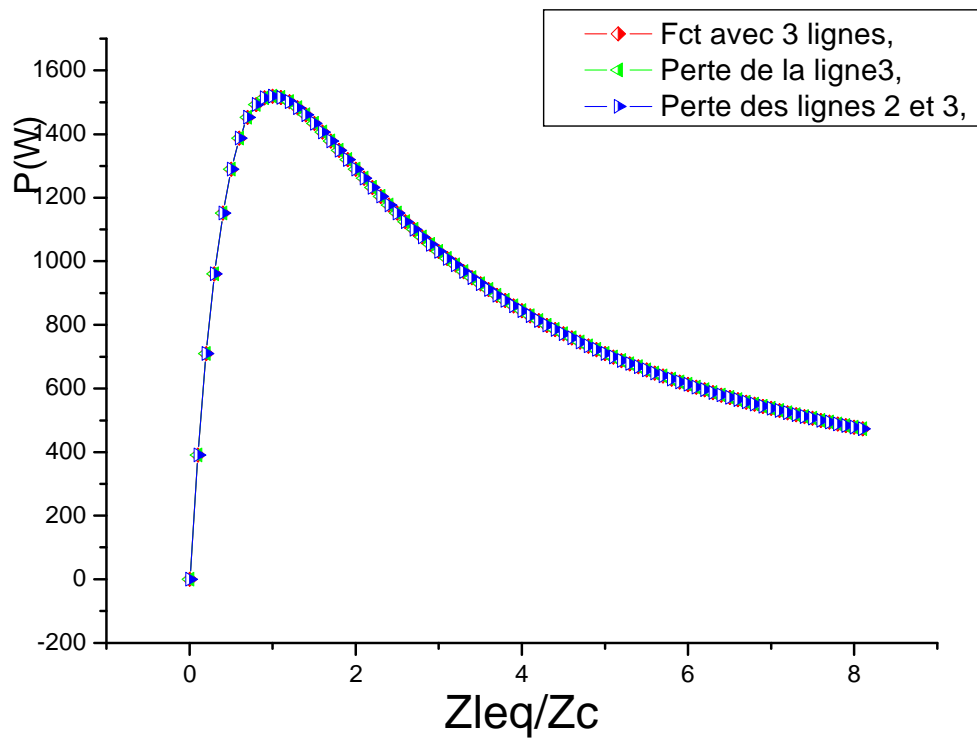


Fig.III.40 Puissance active transmise en fonction de la variation de la charge pour les trois cas considérés.

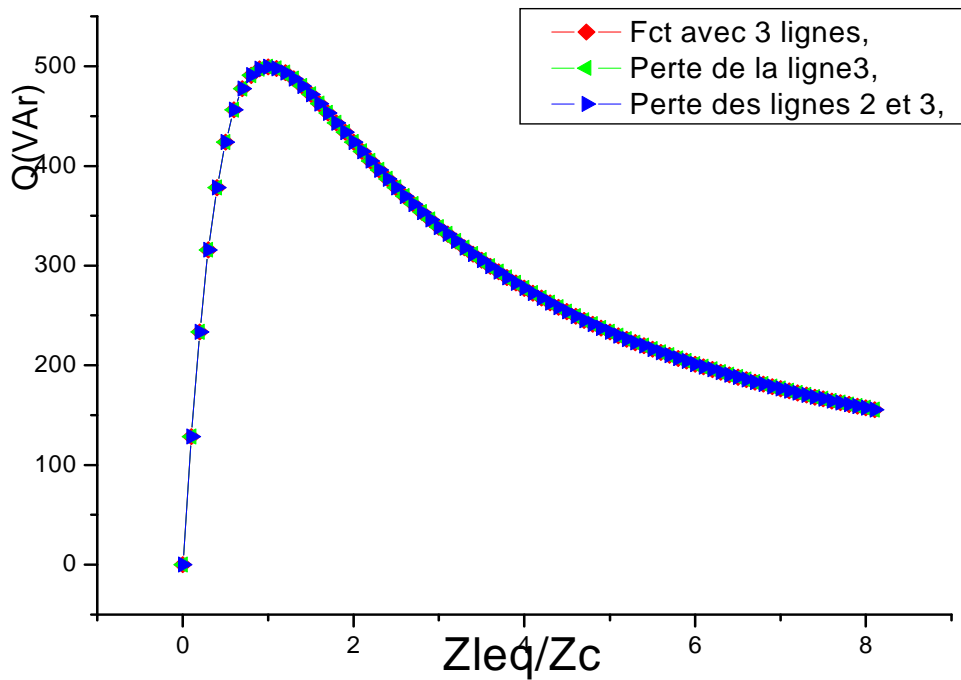


Fig.III.41 Puissance réactive transmise en fonction de la variation de la charge, pour les trois cas considérés.

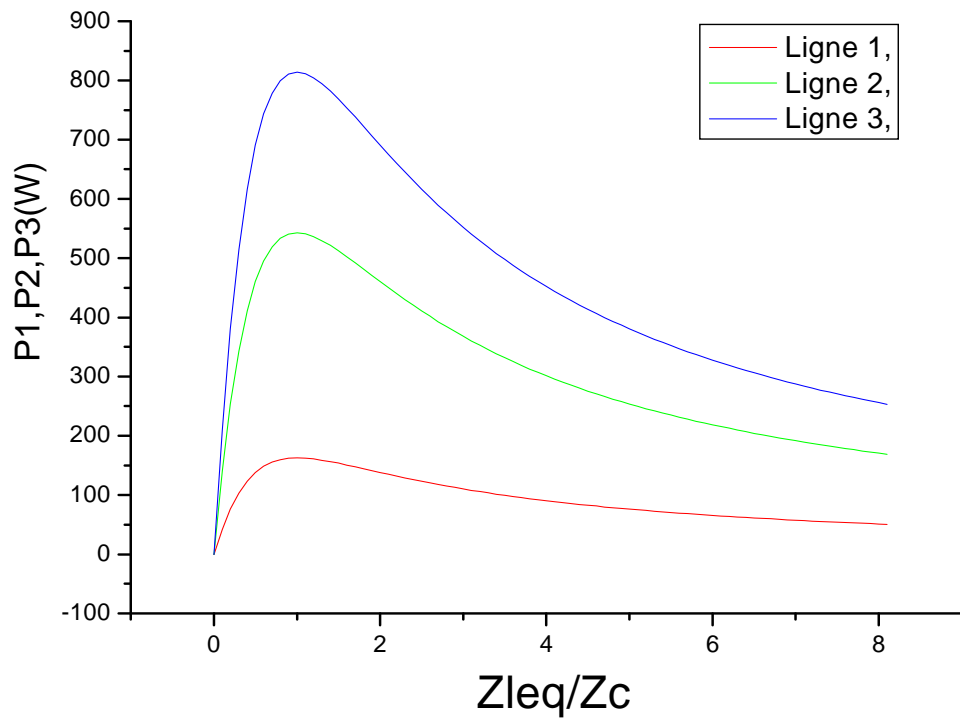


Fig.III.42 Puissances actives transmises par ligne à la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où les trois lignes sont opérationnelles.

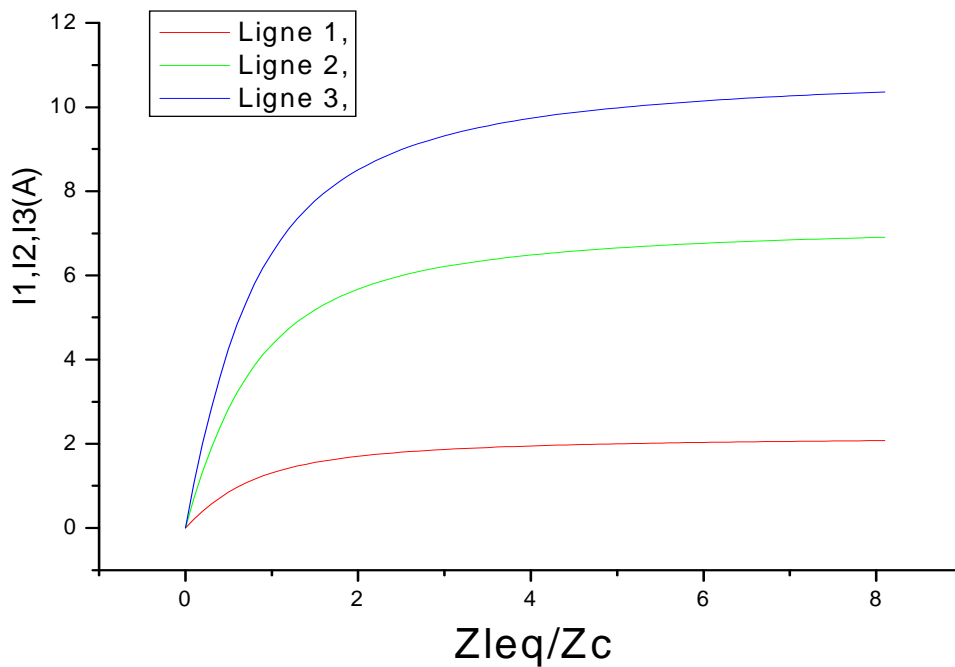


Fig.III.43 Courants transitant par ligne vers la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où les trois lignes de transport sont opérationnelles.

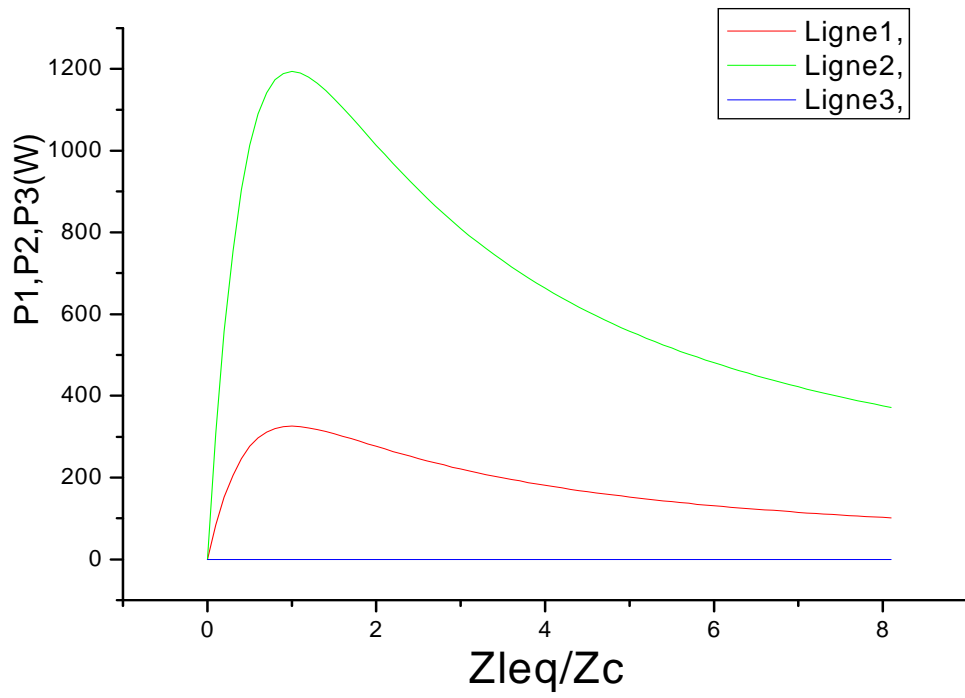


Fig.III.44 Puissances actives transmises par ligne à la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où il y'a perte de la troisième ligne.

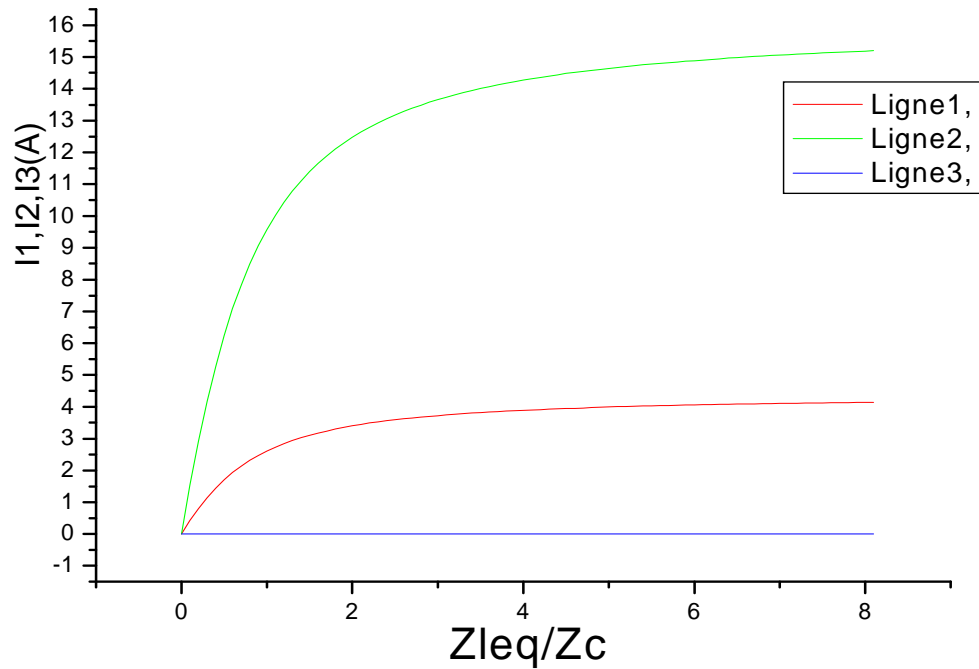


Fig.III.45 Courants transitant par ligne vers la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où il y'a perte de la troisième ligne de transport.

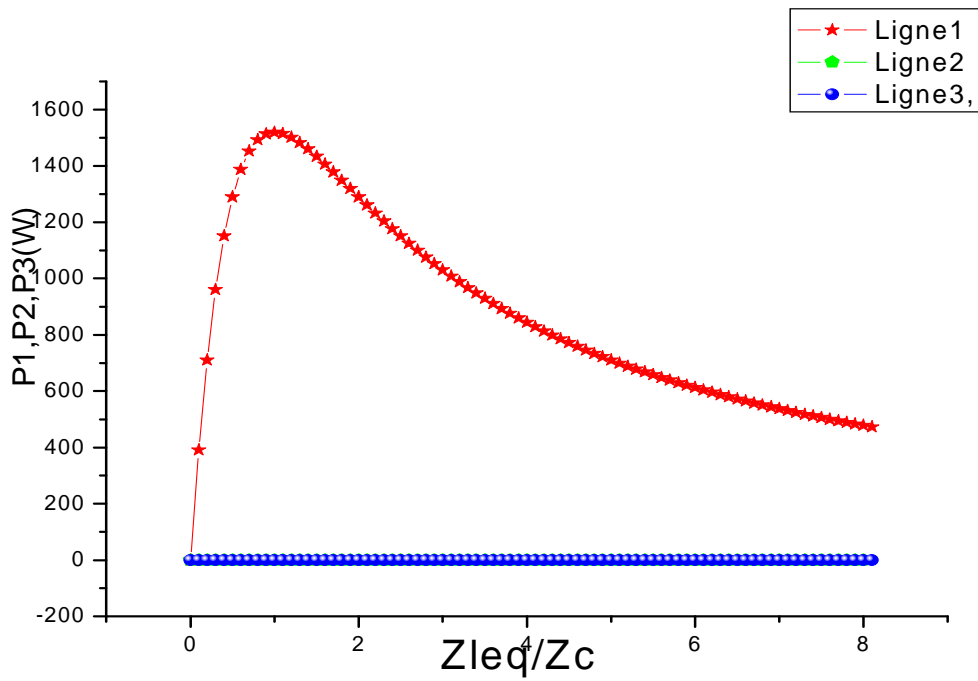


Fig.III.46 Puissances actives transmises par ligne à la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où il y'a perte des deuxième et troisième lignes de transport.

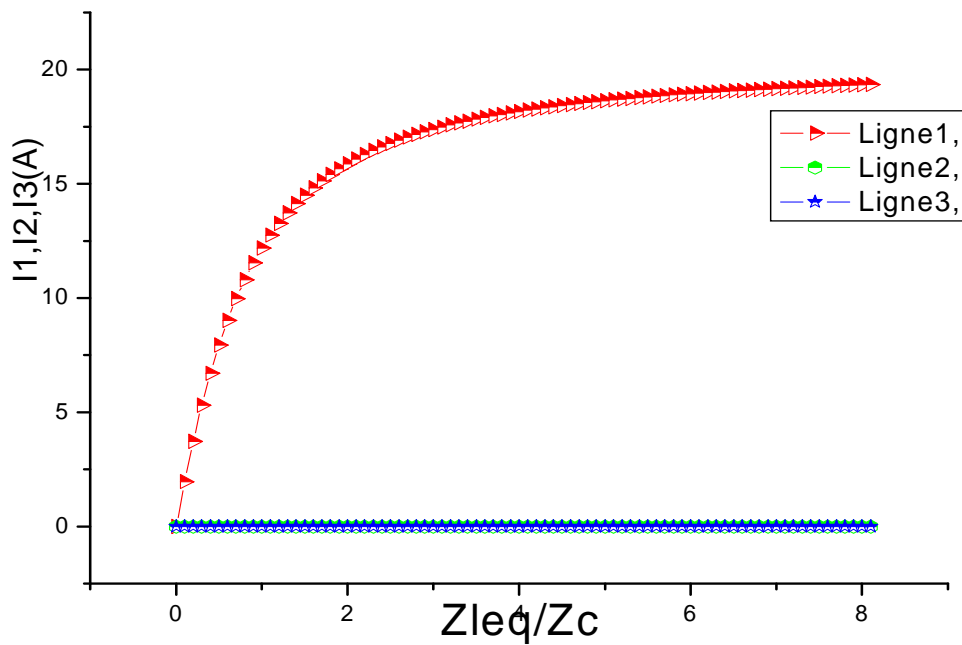


Fig.III.47 Courants transitant par ligne vers la charge en fonction de la variation de cette dernière, pour le cas où il y'a perte des deuxième et troisième lignes de transport.

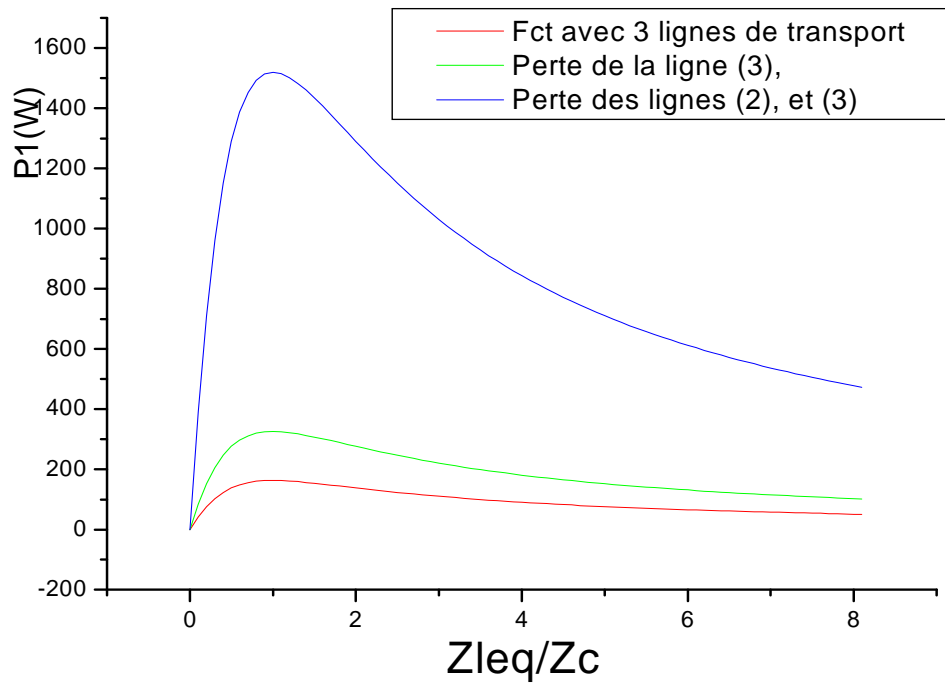


Fig.III.48 Puissance transitant via la ligne 1 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

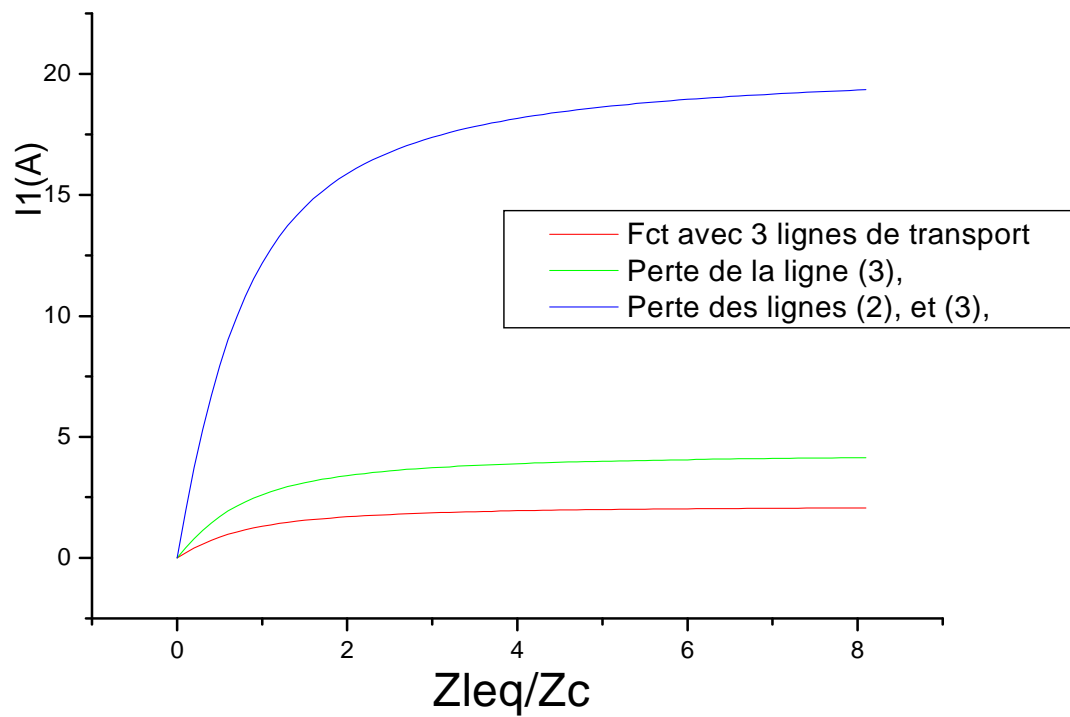


Fig.III.49 Courants transitant via la ligne 1 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

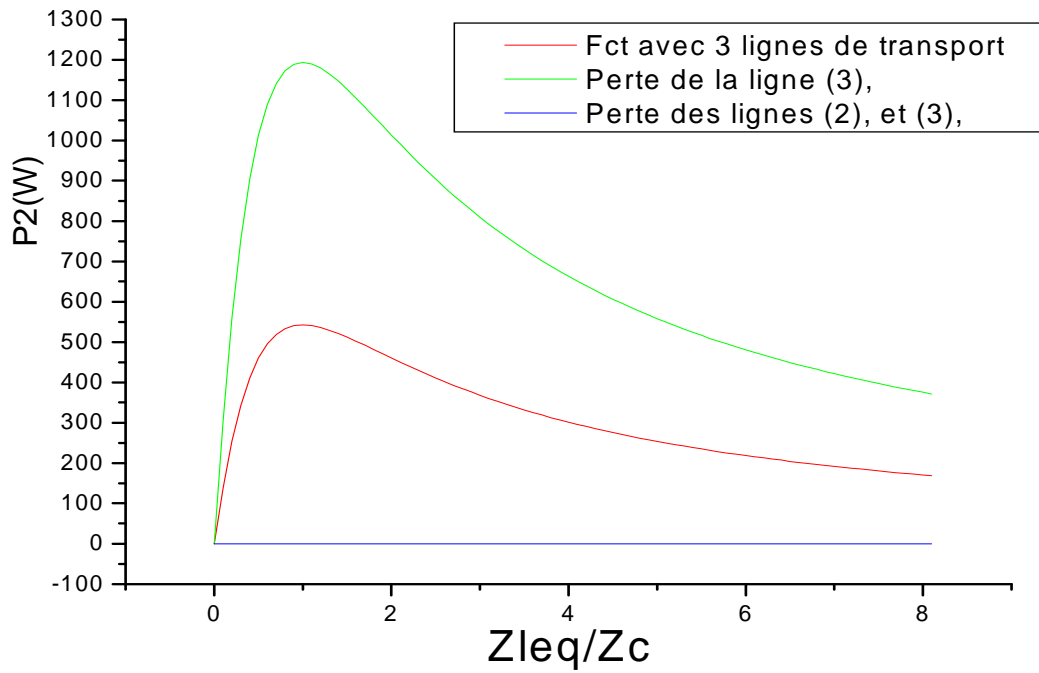


Fig.III.50 Puissance transitant via la ligne 2 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

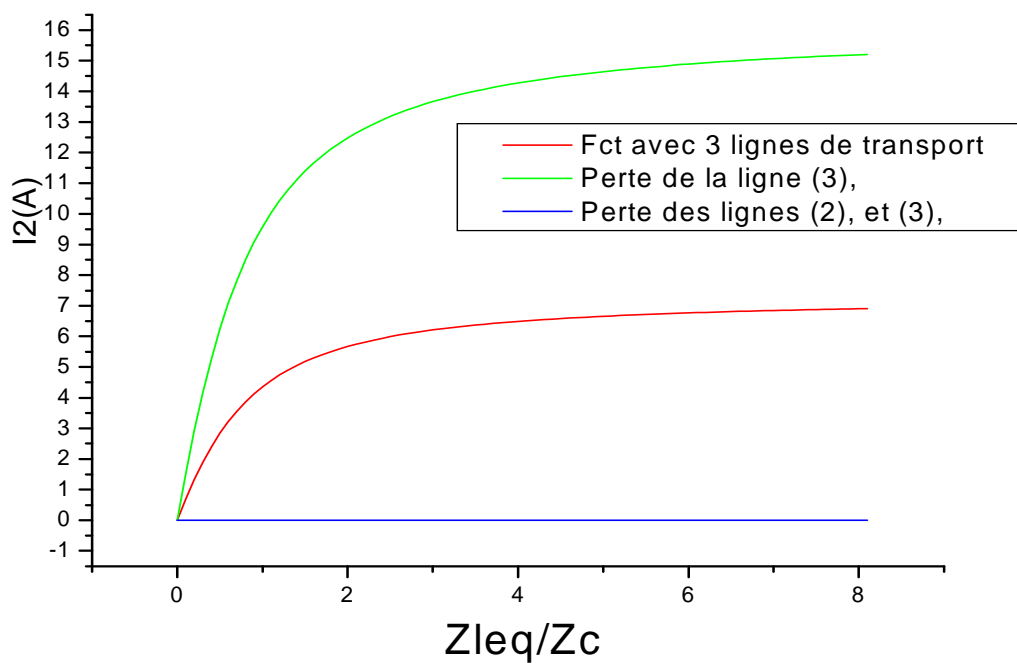


Fig.III.51 Courants transitant via la ligne 2 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

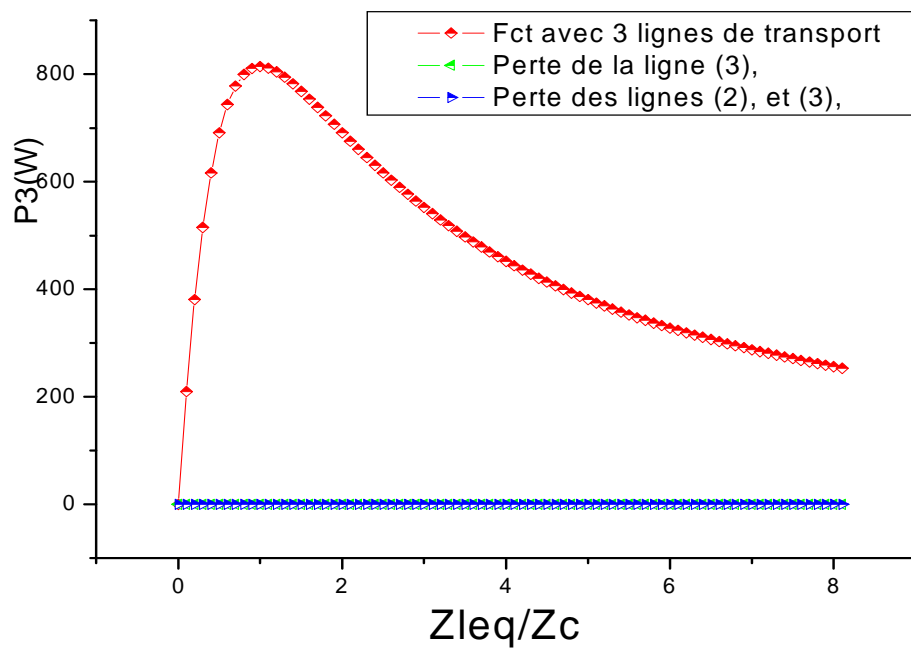


Fig.III.52 Puissance transitant via la ligne 3 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

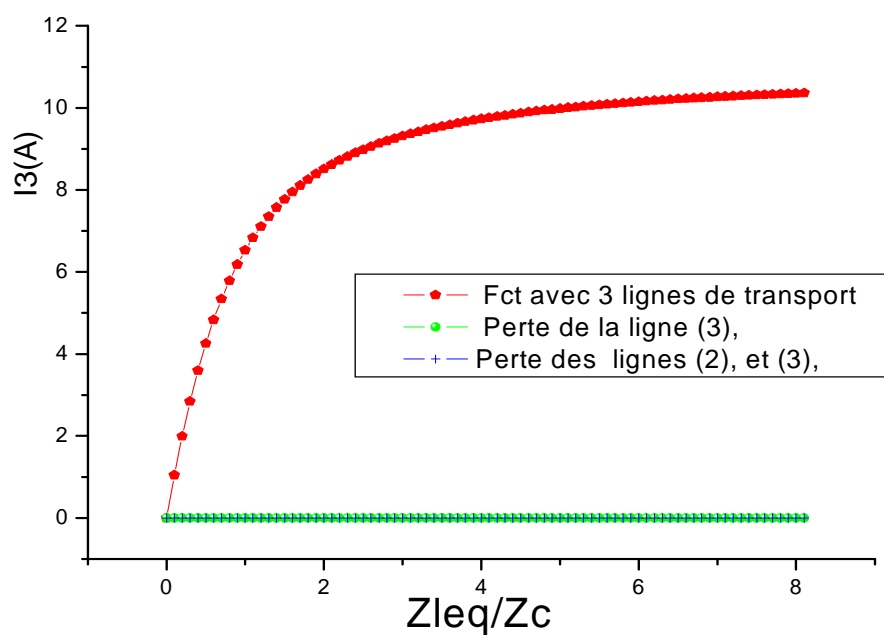


Fig.III.53 Courants transitant via la ligne 3 en fonction de la variation de la charge, pour les différents cas considérés.

La figure **(III.37)** montre l'évolution du courant appelé, de la tension réceptrice, et des puissances active et réactive consommées par la charge traitée en fonction de la variation de cette dernière.

Les allures obtenues sur cette figure sont de formes identiques à celles illustrées sur les figures **[(III.14) et (III.33)]** qui montrent l'évolution des grandeurs électriques pour les cas mettant en évidence le processus de la stabilité en tension et le phénomène de la rupture du synchronisme. A partir de là, on déduit que les interprétations et les remarques à tirer des évolutions des grandeurs électriques présentées en figure **(III.37)** sont semblables à celles des figures **[(III.14) et (III.33)]**. On remarque tout de même que les valeurs des grandeurs électriques fournies par les figures énumérées diffèrent d'une figure à l'autre selon les cas.

Pour les grandeurs électriques illustrées, les valeurs les plus élevées sont celles données par la figure **(III.37)**, et cela par rapport aux deux autres figures. On remarque en effet que la puissance acheminée vers la charge est plus importante pour le cas traitant du phénomène des surcharges en cascade, et c'est ainsi que l'on atteint des puissances active et réactive maximales transmissibles à la charge égales à **(Pmax=1513.40W et Qmax = 497.43 Var)**, contre des puissances active et réactive maximales égales à **(Pmax= 162.79 W et Qmax=53.50 Var)** pour le cas où on met en évidence le processus de stabilité en tension, alors que les puissances relevées pour le cas mettant en évidence le phénomène de perte de synchronisme sont **(Pmax=175.19 W et Qmax= 57.58 Var)**.

C'est aussi le même constat pour les courants, pour lesquels on relève les valeurs suivantes ; **(Icmax=20.42 A et Iccrit=11.54 A)** pour le cas mettant en évidence les surcharges en cascade, **(Icmax=2.19 A et Iccrit=1.30 A)** pour le cas mettant en évidence le processus de la stabilité en tension, et enfin **(Icmax=2.26 A et Iccrit =1.36A)** pour la rupture de synchronisme.

La puissance consommée par la charge ainsi que le courant qui la traverse présentent des valeurs légèrement inférieures pour le cas traitant de la stabilité en tension, Cela par rapport au cas traitant de la perte de synchronisme, ceci s'explique par le fait que l'on utilise dans le second cas un circuit de base composé d'une ligne de transmission et d'une charge impédante, presque identique à celui utilisé pour la mise en évidence du processus de la stabilité en tension, mis à part le fait qu'on utilise une ligne impédante lors du premier cas, et la même ligne dont on néglige l'effet résistif dans le second cas **(perte de synchronisme)**.

C'est ainsi que la légère augmentation en puissance active constatée pour le cas mettant en évidence la rupture de synchronisme, s'explique par l'absence de pertes actives et dont la résistance de la ligne est à l'origine.

On déduit donc que la puissance est augmentée pour le cas des surcharges en cascade où la transmission de l'énergie demandée par la charge est garantie par un système de transport composé de trois lignes impédantes en parallèle, ce qui justifie l'important apport en puissance transitée vers la charge, la nécessité de disposer du plus grand nombre de liens de transmission en parallèle dans un réseau de transport est ainsi mis en évidence, dans le but d'augmenter la puissance transmissible. Des comparaisons avec le cas traitant du processus de la stabilité en tension et où on a

fait varier l'impédance de la ligne, et celui de la perte de synchronisme où on a modifié successivement la réactance inductive de la ligne de transport, fournissent des résultats concordants. Autrement dit pour transporter de plus grandes puissances sur les lignes, il est vital de disposer d'un plus grand nombre de lignes en parallèle, cela a pour effet de raccourcir les distances électriques entre les générateurs et les charges.

Les figures [(III.38),(III.39),(III.40) et (III.41)] montrent l'évolution du courant total transité vers la charge, de la tension à ses bornes, et des puissances active et réactive totales absorbées par cette dernière, cela pour les trois phases de fonctionnement considérées pour la mise en évidence du phénomène des surcharges en cascade, on cite à titre de rappel ; le fonctionnement avec les trois lignes de transmission, le fonctionnement avec deux lignes de transmission suite à la perte de la ligne(3), et le fonctionnement avec une seule ligne (perte simultanée des lignes (3) et (2)).

On constate sur les figures que non seulement toutes les grandeurs électriques et cela pour les différentes phases de fonctionnement considérées présentent des évolutions de forme similaire, mais leurs valeurs sont aussi identiques et cela au niveau de tous les points de fonctionnement, ce qui explique la superposition des allures obtenues.

On déduit donc que malgré le fait qu'on ait subi la perte d'une ligne ou de deux lignes, le système de transmission continue à faire transiter les mêmes puissances actives et réactives, le même courant appelé par la charge qui garde une tension inchangée à ses bornes, d'où l'existence d'un phénomène de report de charges (cumulatif) dans les deuxième et troisième phases de fonctionnement considérées (où il y'a perte d'éléments de transport).

Par ailleurs, et du fait de la ressemblance de ces figures avec les figures [(III.15), (III.16), (III.17) et (III.18)] obtenues lors de la mise en évidence du processus de stabilité en tension, les interprétations et remarques supplémentaires à faire concernant les allures, les zones de fonctionnement normal et anormal du système sont les mêmes que celles apportées pour les précédentes figures mentionnées.

Le phénomène des surcharges en cascade (ou report de charges) est mis en évidence sur les figures [(III.42), (III.44), (III.46) et (III.43), (III.45), (III.47)] qui montrent respectivement les transits des puissances actives partielles (par ligne de transport), et des courants partiels en fonction de la variation de la charge traitée, et cela pour la première phase considérée où le fonctionnement s'effectue avec trois lignes de transmission, la seconde phase où il y'a perte de la ligne(3), puis pour la troisième phase où il y'a perte des lignes (3) et (2) de façon simultanée.

La première phase de fonctionnement est illustrée sur les figures [(III.42) et (III.43)]. Les puissances actives partielles acheminées par ligne (P1, P2, et P3) présentent la même allure, et c'est pareil pour les courant (I1, I2, et I3), néanmoins les valeurs de ces grandeurs diffèrent d'une ligne à l'autre à cause des valeurs des impédances des lignes qui sont différentes.

C'est ainsi que l'on constate que le courant le plus intense, et implicitement la puissance la plus élevée transportée par ligne sont convoyés à travers la ligne (3), qui présente l'impédance de ligne dont la valeur est la moins élevée. La ligne (2) seconde la ligne (3), du fait de son impédance de ligne supérieure à celle de la ligne (3), et c'est la ligne (1) dont l'impédance (Z11) présente la valeur la plus élevée parmi les trois impédances, qui assure le transit de courant et de puissance active le moins

élevé. Tout cela explique l'inégalité entre les transits de courant et de puissance sur les lignes **[(1), (2), et (3)]** lors de cette première phase de fonctionnement considérée pour l'étude du phénomène traité.

La seconde phase de fonctionnement pour l'étude du phénomène des surcharges en cascade est illustrée sur les figures **[(III.44), et (III.45)]**, cette phase correspondant à la perte de la ligne **(3)** du réseau de transmission.

Ces figures montrent que les puissances actives **(P1, et P2)** acheminées sur les lignes **(1) et (2)** respectivement, et les courants **(I1, et I2)**, progressent selon les mêmes allures, alors que la puissance active partielle **P3** et le courant partiel **I3** transmis à la charge considérée via la ligne **(3)** s'annulent du fait de l'ouverture de cette ligne.

Cette situation met en évidence le phénomène de report de charges, en effet une comparaison avec les deux précédentes figures **[(III.42) et (III.43)]** montre une élévation des puissances actives partielles **(P1 et P2)**, ainsi que des courants **(I1 et I2)** sur les lignes **(1) et (2)** dans la seconde phase **(Fig.III.44) et (Fig.III.45)** par rapport à la précédente phase (où les trois lignes sont opérationnelles) illustrée sur les figures **[(III.42) et (III.43)]**.

A présent, c'est la ligne **(2)** qui assure l'acheminement du plus important transit en puissance et en courant sur le réseau de transmission, cependant les valeurs relevées sur les deux lignes **(1) et (2)** sont très élevées du fait des courants intenses et non préconisés circulant dans ces lignes. Ceci est dû au phénomène de report de charges à partir de la ligne **(3)** vers les lignes **(1) et (2)** suite à la perte de la ligne **3**. Autrement dit la puissance **P3** et le courant **I3** dont le transit était auparavant assuré par la ligne **(3)** s'est reporté sur les deux autres lignes contraintes de garantir l'acheminement de puissances plus élevées, et de courants plus intenses lors de cette seconde phase et par rapport à la précédente, cela de manière conforme aux lois d'impédances régissant la nouvelle configuration du système étudié.

Bien évidemment, ces résultats restent théoriques car en conditions réelles d'exploitation, les lignes constituant le système de transmission d'énergie se trouvent toujours sous de fortes contraintes, et les capacités des lignes de transport sont limitées en matière de courant maximal toléré et implicitement en puissance maximale transmissible qui constituent des limites à ne pas transgresser, tant que cette condition est respectée, le fonctionnement normal et optimal est garanti. Sinon les lignes du réseau de transmission risquent fortement de subir le phénomène tant redouté des surcharges en cascade.

Les figures **[(III.46), et (III.47)]** illustrent parfaitement ce phénomène étudié, et sont de surcroît la suite logique du déroulement typique et extrême de ce phénomène des surcharges en cascade, en effet suite au déclenchement des lignes **(2), et (3)**, les puissances actives **(P2 et P3)** et les courants **(I2 et I3)** transités par ces lignes sont tous nuls contrairement aux deux précédentes situations (phases).

On constate néanmoins la forte intensité du courant **(I1)** et l'augmentation importante de la puissance **(P1)** de la ligne **(1)** toujours par rapport aux deux précédentes phases de fonctionnement, ceci s'explique par le fait que la totalité de la puissance active et du courant délivré à la charge à

partir de la source de tension transite sur la ligne **(1)** qui doit à présent faire face à une forte demande énergétique de la part de la charge traitée.

Le phénomène des surcharges en cascade est aussi mis en évidence sur les figures [(III.48), (III.49), (III.50), (III.51), (III.52), et (III.53)] qui montrent les allures des puissances actives et des courants par ligne en fonction de la variation de la charge, en considérant les trois phases de fonctionnement du système.

Ces figures confirment les résultats obtenus lors de l'analyse des précédentes figures [(III.42), (III.43), (III.44), (III.45), (III.46) et (III.47)], et fournissent cette fois-ci le comportement individuel de chacune des trois lignes **(1, 2, et 3)** durant les trois précédentes phases citées. Ces figures expliquent le pourquoi des courbes superposées illustrées sur les figures [(III.38), (III.39), (III.40) et (III.41)] et qui montrent que la puissance active totale et le courant total délivrés à la charge restent inchangés malgré les trois différentes phases de fonctionnement considérées.

Les figures [(III.48) et (III.49)] donnant la puissance **P1** et le courant **I1**, montrent que **P1** et **I1** augmentent à chaque nouveau déclenchement de ligne, cela traduit la tendance de la ligne **(1)** à assurer l'approvisionnement total (au court de la troisième phase), et partiel (au court de la seconde phase considérée) en énergie électrique dont la charge manifeste un besoin constant entre les différentes phases.

Ces résultats restent comme pour ceux des figures [(III.42), (III.43), (III.44), (III.45), (III.46) et (III.47)], dans les limites des conditions théoriques liés au circuit de base utilisé pour la mise en évidence du phénomène.

Les figures [(III.50), (III.51)] donnant la puissance et le courant (**P2** et **I2**) transmis sur la ligne **(2)** pour les différentes phases de fonctionnement considérées montrent que ces grandeurs électriques augmentent dans la seconde phase considérée suite à la perte de la ligne **(3)**, ce qui signifie que tout comme la ligne **(1)**, la ligne **(2)** assure l'acheminement du transit énergétique assuré par la ligne **(3)** auparavant, et cela de manière partielle. Alors que **P2** et **I2** sont nuls lors de la troisième phase, et se retrouvent reportés intégralement sur la ligne **(1)**.

Les figures [(III.52) et (III.53)] qui donnent respectivement la puissance **P3**, et le courant **I3** sur la ligne **(3)** montrent que ces grandeurs sont bel et bien transmises sur cette ligne dans la première phase. Alors que dans les deux autres cas ces dernières s'annulent sur la ligne **(3)** à cause de l'incident des surcharges en cascade à partir de la ligne **(3)** vers les lignes **(1)** et **(2)** dans un premier temps, et la ligne **(1)** dans un second temps.

Cette situation est typiquement caractéristique du phénomène étudié dans son déroulement extrême, c'est-à-dire où seulement une ligne appartenant au réseau de transmission est opérationnelle pour assurer l'important transit énergétique demandé et pour lequel cette ligne n'est certainement pas dimensionnée (**dans des conditions d'exploitation réelles**).

En effet, et dans la réalité, de tels dépassements inacceptables d'ailleurs en courant maximal toléré et implicitement en puissance active maximale transmise sur des ouvrages de transmission d'énergie (**dans ce cas la ligne(1)**) auraient immédiatement ou par la suite (selon l'ampleur des

dépassements) causé des échauffements importants des conducteurs de la ligne, et leurs allongements inévitables, donc leurs rapprochement du sol, et comme conséquences directes tout ce que ce genre d'événement présente comme risques et dangers pour les vies humaines et les biens.

III.2.3.2 Conclusion

Après la mise en équations des grandeurs électriques qui sont ; le courant, la tension réceptrice, et les puissances actives et réactives, et l'obtention de différents résultats illustrant l'évolution des grandeurs électriques en faisant varier la charge (**Fig.III.37**), et en particulier des puissances actives consommées et des courants transités vers la charge (pour les autres figures), on constate que ;

Les surcharges en cascade sont un phénomène faisant solliciter au maximum de leurs limites les ouvrages de transport d'énergie électrique, et bien que pour toutes les phases de fonctionnement considérées les représentations graphiques présentent les mêmes formes pour une même grandeur électrique illustrée (puissance active et courant), l'apport dû à l'utilisation de trois lignes en parallèle est clairement mis en évidence, c'est en effet grâce à cette configuration (disposition) que l'on a pu atteindre une telle puissance et un tel courant transportables sur le réseau de transmission, chose qui est impossible sur un réseau constitué d'une seule ligne.

Il est donc clair que pour limiter au mieux cette catégorie d'incidents que sont les report de charge, il est vital de disposer du plus grand nombre d'ouvrages de transport, en effet augmenter dans la mesure du possible le nombre de lignes en parallèle, et s'assurer du bon dimensionnement des protections, garantissent au système l'acheminement de plus grandes puissances vers les consommateurs, et les résultats obtenus lors des différents essais le confirment bien.

Le phénomène des surcharges en cascade a été clairement mis en évidence (théoriquement), et il s'avère être un mécanisme très dangereux, on constate qu'il engendre un effet cumulatif sur les liens de transmission suite au déclenchement initial d'une ligne ou de plusieurs d'entre elles (résultant du maintien d'intensités beaucoup trop élevées en courant).

Si les circonstances sont favorables (forte demande énergétique et/ou structures de transport insuffisantes), le phénomène se développe alors aggravant les conditions d'exploitation et se manifeste par une série de déclenchements consécutives de lignes, comme on a pu à le vérifié lors de cette simulation dans les deuxième et troisième phases considérées pour l'étude du phénomène.

Ces déclenchements vont conduire jusqu'à rompre toute voie d'acheminement de l'énergie électrique vers la charge, **d'où naît l'un des quatre grands incidents majeurs, qui est les surcharges en cascades.**

Ce qu'on peut conclure aussi et qui sera dans l'intérêt d'éviter les surcharges en cascade, est qu'il est vital qu'un système électrique soit équipé de lignes de secours.

CONCLUSION GENERALE

Après des rappels sur le système électrique, et après avoir donné les différentes perturbations auxquelles un réseau est souvent soumis. Ce travail a consisté dans une première étape à l'établissement des équations électriques en utilisant un réseau simplifié.

Dans une seconde étape, on a fait appel à la simulation numérique où on a utilisé le langage de programmation informatique « FORTRAN ».

Après avoir relevé les différents résultats, qui ont permis la mise en évidence des trois phénomènes traités, on peut conclure que :

Pour le processus de stabilité en tension ; il existe une puissance maximale qui peut être transmise à la charge, qui ne peut être dépassée, pour laquelle on enregistre pour tous les cas une tension critique, qui représente la limite de stabilité en tension. L'instabilité en tension dans un réseau d'énergie électrique résulte de la tentative de ce dernier de vouloir fonctionner au-delà de sa puissance maximale délivrable. Cette puissance maximale est dépendante de la tension de la source dont l'augmentation renforce la limite de la stabilité, ainsi que la diminution de l'impédance de la ligne à travers laquelle elle transite, et du facteur de puissance (compensation, surcompensation).

Pour le phénomène de la perte de synchronisme; La limite de stabilité angulaire d'un système d'énergie correspond dans tous les cas à l'existence d'une puissance maximale transmissible, cette limite correspond à un angle interne critique, au-delà duquel le fonctionnement synchrone n'est plus assuré. Pour que le système fonctionne au synchronisme, il faut que l'angle interne varie dans le même sens que la puissance active transmise, sinon c'est la rupture de synchronisme. D'après les résultats illustrés, on peut aisément déduire qu'exploiter le réseau à sa plus haute tension possible, et l'appel à la compensation de l'énergie réactive par le procédé utilisé lors de la simulation de ce phénomène, joue un rôle important dans le maintien du synchronisme.

Concernant le phénomène des surcharges en cascade, dans l'intérêt d'éviter ces surcharges, il est vital qu'un système électrique dispose de plusieurs lignes en parallèle pour la desserte de puissances vers les consommateurs, et de lignes de secours.

Ce travail est juste une initiation à l'étude de ces phénomènes, il est souhaitable qu'il soit complété par la mise en évidence du quatrième phénomène (écroulement de fréquence), de traiter ces phénomènes sur un réseau complexe, de mettre en évidence l'influence des régulateurs de tension et de vitesse, faire appel à une partie expérimentale pour mieux conclure sur ces phénomènes.....etc.

Sinon ce travail nous a apporté:

- Des connaissances dans les domaines de stabilité et de sauvegarde des systèmes électriques, spécialement en ce qui concerne les mécanismes de dégradation (blackouts),
- Les bases de la simulation numérique, notamment en langage de programmation informatique «FORTRAN».

ANNEXES

ANNEXE (I)

I.1 Cas d'une ligne et charge impédantes

I.1.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_L = Z_L(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_L(\cos\theta + j\sin\theta) + Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi)}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{(Z_L\cos\theta + Z_C\cos\varphi) + j(Z_L\sin\theta + Z_C\sin\varphi)}$$

L'expression du courant circulant à travers la charge en module sera :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_L)^2(\cos^2\theta + \sin^2\theta) + (Z_C)^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) + 2Z_LZ_C(\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi)}}$$

Tout en sachant que :

$$(\cos^2\theta + \sin^2\theta) = 1$$

$$(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = 1$$

et

$$\cos\theta\cos\varphi = 1/2[\cos(\theta + \varphi) + \cos(\theta - \varphi)]$$

$$\sin\theta\sin\varphi = 1/2[\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta + \varphi)]$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_LZ_C\cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_L)^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta - \varphi) \right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta - \varphi)}}$$

I.1.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge et l'égaliser à zéro.

$$P_c = \frac{Z_c E^2}{(Z_L)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_c}{[(Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)]} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)((Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)) - (2Z_c + 2Z_L \cos(\theta - \varphi))(Z_c E^2 \cos \varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_L)^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi))(E^2 \cos \varphi) - 2(Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi))(E^2 \cos \varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(Z_L)^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(Z_L^2 - Z_c^2)}{[(Z_L)^2 + (Z_c)^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(Z_L^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow Z_L^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow Z_c = Z_L$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne (**$Z_c = Z_L$**)

$$P_{c \max} = \frac{Z_L E^2}{(Z_L)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$P_{c \max} = \frac{E^2}{2Z_L [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos \varphi$$

I.1.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_c = \frac{Z_c E^2}{(Z_L)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = E^2 \sin\varphi \left[\frac{Z_C}{[(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)]} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin\varphi)((Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)) - (2Z_C + 2Z_L \cos(\theta - \varphi))(Z_C E^2 \sin\varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_L)^2 (E^2 \sin\varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \sin\varphi) + (2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi))(E^2 \sin\varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \sin\varphi) - (2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi))(E^2 \sin\varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_L)^2 (E^2 \sin\varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \sin\varphi)}{[(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin\varphi)(Z_L^2 - Z_C^2)}{[(Z_L)^2 + (Z_C)^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin\varphi)(Z_L^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow Z_L^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = Z_L}$$

En remplaçant Z_C par Z_L dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{Z_L E^2}{(Z_L)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin\varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_L [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin\varphi$$

I.1.4 Expression du courant critique.

Il suffit de remplacer Z_C par Z_L dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = Z_L) = \frac{E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{Z_L [2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.1.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_C par Z_L dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = Z_L) = \frac{Z_L E}{Z_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_L}{Z_L} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.2 Cas d'une ligne inductive et charge impédante

I.2.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

L'écriture complexe de l'équation pour le circuit considéré est :

$$\bar{E} = jX_L \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

$$\bar{E} = jX_L \bar{I}_C + Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi)\bar{I}_C$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_C \cos\varphi + j(Z_C \sin\varphi + X_L)}$$

En module

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 \cos^2\varphi + (Z_C \sin\varphi + X_L)^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) + 2Z_C X_L \sin\varphi + X_L^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 + 2Z_C X_L \sin\varphi + X_L^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{X_L^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L} \right) \sin\varphi \right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L} \right) \sin\varphi}}$$

I.2.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{X_L^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_L} \right) \sin\varphi \right)} \cos\varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos\varphi \left[\frac{Z_C}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2X_L Z_C \sin\varphi]} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)((X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_L \sin \varphi)(Z_c E^2 \cos \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_L)^2(E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2(E^2 \cos \varphi) + (2 X_L Z_C \sin \varphi)(E^2 \cos \varphi) - 2(Z_c)^2(E^2 \cos \varphi) - (2X_L Z_C \sin \varphi)(E^2 \cos \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_L)^2(E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2(E^2 \cos \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(X_L^2 - Z_C^2)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(X_L^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow X_L^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = X_L}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance de la ligne (**Zc = X_L**)

$$P_{c \max} = \frac{X_L E^2}{(X_L)^2 \left(1 + \left(\frac{X_L}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_L}{X_L} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$P_{c \max} = \frac{E^2}{2X_L [1 + \sin \varphi]} \cos \varphi$$

1.2.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_c = \frac{Z_c E^2}{(X_L)^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_L} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_c}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)((X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_L \sin \varphi)(Z_c E^2 \sin \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_L)^2(E^2 \sin \varphi) + (Z_C)^2(E^2 \sin \varphi) + (2 X_L Z_C \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi) - 2(Z_c)^2(E^2 \sin \varphi) - (2X_L Z_C \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_L)^2(E^2 \sin \varphi) - (Z_C)^2(E^2 \sin \varphi)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2 X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(X_L^2 - Z_C^2)}{[(X_L)^2 + (Z_C)^2 + 2X_L Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(X_L^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow X_L^2 - Z_C^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{Z_C = X_L}$$

En remplaçant $\mathbf{Z_C}$ par $\mathbf{X_L}$ dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{X_L E^2}{(X_L)^2 \left(1 + \left(\frac{X_L}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_L}{X_L} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_L [1 + \sin \varphi]} \sin \varphi$$

1.2.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer $\mathbf{Z_C}$ par $\mathbf{X_L}$ dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_L) = \frac{E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{X_L}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_L}{X_L} \right) \sin \varphi}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{X_L \sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

1.2.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer $\mathbf{Z_C}$ par $\mathbf{X_L}$ dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_L) = \frac{X_L E}{X_L \sqrt{1 + \left(\frac{X_L}{X_L} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_L}{X_L} \right) \sin \varphi}}$$

$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

1.3 Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante en introduisant la réactance

synchrone de l'alternateur.

1.3.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

L'écriture complexe de l'équation pour le circuit considéré est :

$$\bar{E} = j(X_S + X_L)\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T0}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C \quad \text{Avec} \quad X_{T0} = X_S + X_L$$

$$\bar{E} = jX_{T0}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

$$\bar{E} = jX_{T0}\bar{I}_C + Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi)\bar{I}_C$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_C\cos\varphi + j(Z_C\sin\varphi + X_{T0})}$$

En module :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2\cos^2\varphi + (Z_C\sin\varphi + X_{T0})^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) + 2Z_CX_{T0}\sin\varphi + X_{T0}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 + 2Z_CX_{T0}\sin\varphi + X_{T0}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{X_{T0}^2\left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)\sin\varphi\right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{X_{T0}\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)\sin\varphi\right]}}$$

1.3.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T0}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T0}}\right)\sin\varphi\right)} \cos\varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos\varphi \left[\frac{Z_C}{[(X_{T0})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T0}Z_C\sin\varphi]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos\varphi)((X_{T0})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T0}Z_C\sin\varphi) - (2Z_C + 2X_{T0}\sin\varphi)(Z_C E^2 \cos\varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T0}Z_C\sin\varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T0})^2(E^2 \cos\varphi) + (Z_C)^2(E^2 \cos\varphi) + (2X_{T0}Z_C\sin\varphi)(E^2 \cos\varphi) - 2(Z_C)^2(E^2 \cos\varphi) - (2X_{T0}Z_C\sin\varphi)(E^2 \cos\varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T0}Z_C\sin\varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(X_{T0})^2(E^2 \cos\varphi) - (Z_C)^2(E^2 \cos\varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T0}Z_C\sin\varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(X_{T0}^2 - Z_c^2)}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(X_{T0}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow X_{T0}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = X_{T0}}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance totale de la ligne (**Zc = X_{T0}**)

$$P_{c \max} = \frac{X_{T0} E^2}{(X_{T0})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$P_{c \max} = \frac{E^2}{2X_{T0}[1 + \sin \varphi]} \cos \varphi$$

1.3.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_c = \frac{Z_c E^2}{(X_{T0})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T0}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T0}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_c}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)((X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_{T0} \sin \varphi)(Z_c E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T0})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 X_{T0} Z_c \sin \varphi) (E^2 \sin \varphi) - 2(Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2X_{T0} Z_c \sin \varphi) (E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_{T0})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(X_{T0}^2 - Z_c^2)}{[(X_{T0})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T0} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(X_{T0}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow X_{T0}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = X_{T0}}$$

En remplaçant **Zc** par **X_{T0}** dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{X_{T0} E^2}{(X_{T0})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T0}[1 + \sin \varphi]} \sin \varphi$$

I.3.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T0} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T0}) = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right) \sin \varphi}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{X_{T0} \sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.3.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T0} dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T0}) = \frac{X_{T0} E}{X_{T0} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T0}}{X_{T0}} \right) \sin \varphi}}$$

$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.4 Cas d'une ligne inductive et charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur et la réactance d'un transformateur(X_{tr}).

I.4.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

L'écriture complexe de l'équation pour le circuit considéré est :

$$\bar{E} = j(X_S + X_{Tr} + X_L)\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T1}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C \quad \text{Avec } X_{T1} = X_S + X_{Tr} + X_L$$

$$\bar{E} = jX_{T1}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

$$\bar{E} = jX_{T1}\bar{I}_C + Z_C(\cos \varphi + j \sin \varphi)\bar{I}_C$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_C \cos \varphi + j(Z_C \sin \varphi + X_{T1})}$$

En module :

$$I_c = \frac{E}{\sqrt{Z_c^2 \cos^2 \varphi + (Z_c \sin \varphi + X_{T1})^2}}$$

$$I_c = \frac{E}{\sqrt{Z_c^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + 2Z_c X_{T1} \sin \varphi + X_{T1}^2}}$$

$$I_c = \frac{E}{\sqrt{Z_c^2 + 2Z_c X_{T1} \sin \varphi + X_{T1}^2}}$$

$$I_c = \frac{E}{\sqrt{X_{T1}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right]}}$$

$$I_c = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right]}}$$

1.4.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

$$P_c = \frac{Z_c E^2}{X_{T1}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_c}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)((X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_{T1} \sin \varphi)(Z_c E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T1})^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2 X_{T1} Z_c \sin \varphi) (E^2 \cos \varphi) - 2(Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2 X_{T1} Z_c \sin \varphi) (E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_{T1})^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(X_{T1}^2 - Z_c^2)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(X_{T1}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow X_{T1}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow Z_c = X_{T1}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance totale de la ligne ($Z_c = X_{T1}$)

$$P_{C \max} = \frac{X_{T1} E^2}{(X_{T1})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T1}[1 + \sin \varphi]} \cos \varphi$$

I.4.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_c = \frac{Z_c E^2}{(X_{T1})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_c}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)((X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_{T1} \sin \varphi)(Z_c E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T1})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 X_{T1} Z_c \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi) - 2(Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2 X_{T1} Z_c \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_{T1})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(X_{T1}^2 - Z_c^2)}{[(X_{T1})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T1} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(X_{T1}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow X_{T1}^2 - Z_c^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_c = X_{T1}$$

En remplaçant Z_c par X_{T1} dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{X_{T1} E^2}{(X_{T1})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T1}[1 + \sin \varphi]} \sin \varphi$$

1.4.4 Expression du courant critique.

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T1} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T1}) = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}}\right) \sin \varphi}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{X_{T1} \sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

1.4.5 Expression de la tension critique.

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T1} dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T1}) = \frac{X_{T1} E}{X_{T1} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}}\right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T1}}{X_{T1}}\right) \sin \varphi}}$$

$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

1.5 Cas de la compensation série locale.

1.5.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

$$\bar{E} = j[X_S + X_L - X_{C1}] \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

$$\bar{E} = j[X_S + X_L - X_{C1}] \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C = jX_{T2} \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C \quad \text{Avec } X_{T2} = X_S + X_L - X_{C1}$$

$$\bar{E} = j X_{T2} \bar{I}_C + Z_C (\cos \varphi + j \sin \varphi) \bar{I}_C$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_C \cos \varphi + j(Z_C \sin \varphi + X_{T2})}$$

En module :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 \cos^2 \varphi + (Z_C \sin \varphi + X_{T2})^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + 2Z_C X_{T2} \sin \varphi + X_{T2}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 + 2Z_C X_{T2} \sin \varphi + X_{T2}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{X_{T2}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right) \sin \varphi \right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right) \sin \varphi}}$$

1.5.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T2}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{X_{T2}} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_C}{[(X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) ((X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi) - (2Z_C + 2X_{T2} \sin \varphi) (Z_C E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T2})^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2 X_{T2} Z_C \sin \varphi) (E^2 \cos \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2 X_{T2} Z_C \sin \varphi) (E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(X_{T2})^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) (X_{T2}^2 - Z_C^2)}{[(X_{T2})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T2} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi) (X_{T2}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow X_{T2}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = X_{T2}}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance totale de la ligne (**Z_C = X_{T2}**)

$$P_{C \max} = \frac{X_{T2} E^2}{(X_{T2})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right) \sin \varphi \right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T2} [1 + \sin \varphi]} \cos \varphi$$

I.5.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_c = \frac{Z_c E^2}{(X_{T2})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_c}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_c}{X_{T2}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_c}{[(X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)((X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi) - (2Z_c + 2X_{T2} \sin \varphi)(Z_c E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T2})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 X_{T2} Z_c \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi) - 2(Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2X_{T2} Z_c \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(X_{T2})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(X_{T2}^2 - Z_c^2)}{[(X_{T2})^2 + (Z_c)^2 + 2 X_{T2} Z_c \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(X_{T2}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow X_{T2}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = X_{T2}}$$

En remplaçant Z_c par X_{T2} dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{c \max} = \frac{X_{T2} E^2}{(X_{T2})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{c \max} = \frac{E^2}{2X_{T2}[1 + \sin \varphi]} \sin \varphi$$

I.5.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer Z_c par X_{T2} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{c \text{ crit}} = I_c(Z_c = X_{T2}) = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}} \right) \sin \varphi}}$$

$$I_{c \text{ crit}} = \frac{E}{X_{T2} \sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.5.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T2} dans l'expression du courant on aura :

$$V_{C\text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T2}) = \frac{X_{T2}E}{X_{T2} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}}\right)^2 + 2\left(\frac{X_{T2}}{X_{T2}}\right) \sin \varphi}}$$

$$V_{C\text{ crit}} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.6 Cas de la compensation série locale et globale.

I.6.1 Evaluation du courant circulant à travers la charge

L'écriture complexe de l'équation pour le circuit considéré est :

$$\bar{E} = j[X_S - X_{C1} + X_L - X_{C2}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

$$\bar{E} = j[X_S - X_{C1} + X_L - X_{C2}]\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C = jX_{T3}\bar{I}_C + \bar{Z}_C\bar{I}_C$$

$$\text{Avec } X_{T3} = X_S - X_{C1} + X_L - X_{C2}$$

$$\bar{E} = jX_{T3}\bar{I}_C + Z_C(\cos \varphi + j \sin \varphi)\bar{I}_C$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_C \cos \varphi + j(Z_C \sin \varphi + X_{T3})}$$

En module :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 \cos^2 \varphi + (Z_C \sin \varphi + X_{T3})^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + 2Z_C X_{T3} \sin \varphi + X_{T3}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{Z_C^2 + 2Z_C X_{T3} \sin \varphi + X_{T3}^2}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{X_{T3}^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin \varphi\right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin \varphi}}$$

I.6.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{X_{T3}^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin \varphi\right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_C}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)((X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi) - (2Z_C + 2X_{T3} \sin \varphi)(Z_C E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T3})^2(E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2(E^2 \cos \varphi) + (2X_{T3}Z_C \sin \varphi)(E^2 \cos \varphi) - 2(Z_C)^2(E^2 \cos \varphi) - (2X_{T3}Z_C \sin \varphi)(E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(X_{T3})^2(E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2(E^2 \cos \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(X_{T3}^2 - Z_C^2)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2X_{T3}Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(X_{T3}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow X_{T3}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = X_{T3}}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à la réactance totale de la ligne ($\mathbf{Z_C = X_{T3}}$)

$$P_{C \max} = \frac{X_{T3} E^2}{(X_{T3})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}}\right) \sin \varphi\right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T3}[1 + \sin \varphi]} \cos \varphi$$

I.6.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_C = \frac{Z_C E^2}{(X_{T3})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{X_{T3}}\right) \sin \varphi\right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_C}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi]} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)((X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi) - (2Z_C + 2X_{T3} \sin \varphi)(Z_C E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(X_{T3})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 X_{T3} Z_C \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2 X_{T3} Z_C \sin \varphi)(E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(X_{T3})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(X_{T3}^2 - Z_C^2)}{[(X_{T3})^2 + (Z_C)^2 + 2 X_{T3} Z_C \sin \varphi]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(X_{T3}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow X_{T3}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = X_{T3}}$$

En remplaçant Z_C par X_{T3} dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{X_{T3} E^2}{(X_{T3})^2 \left(1 + \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right) \sin \varphi \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2X_{T3} [1 + \sin \varphi]} \sin \varphi$$

I.6.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T3} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = X_{T3}) = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right) \sin \varphi}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{X_{T3} \sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.6.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_C par X_{T3} dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = X_{T3}) = \frac{X_{T3} E}{X_{T3} \sqrt{1 + \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right)^2 + 2 \left(\frac{X_{T3}}{X_{T3}} \right) \sin \varphi}}$$

$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}}$$

I.7 Première phase (fonctionnement avec trois lignes de transmission).

I.7.1 Evaluation des courants transités à la charge

- Le courant total transité à la charge

$$\bar{E} = \overline{Z_{Leq}} \cdot \bar{I}_C + \bar{V}_C$$

$$\bar{V}_C = \overline{Z_C} \bar{I}_C$$

$$\bar{E} = \overline{Z_{Leq}} \cdot \bar{I}_C + \overline{Z_C} \bar{I}_C$$

Sachant que :

$$Z_{Leq} = \frac{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}Z_{L2}} \right) \cdot Z_{L3}}{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}Z_{L2}} \right) + Z_{L3}} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L3}(Z_{L1} + Z_{L2})}$$

$$Z_{Leq} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L1}Z_{L3} + Z_{L2}Z_{L3}}$$

$$\Rightarrow \bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\overline{Z_{Leq}} + \overline{Z_C}} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \overline{Z_{Leq}} = Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \overline{Z_C} = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\overline{Z_{Leq}}(\cos\theta + j\sin\theta) + \overline{Z_C}(\cos\varphi + j\sin\varphi)}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{(\overline{Z_{Leq}}\cos\theta + \overline{Z_C}\cos\varphi) + j(\overline{Z_{Leq}}\sin\theta + \overline{Z_C}\sin\varphi)}$$

L'expression du courant circulant à travers la charge en module sera :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(\overline{Z_{Leq}})^2(\cos^2\theta + \sin^2\theta) + (\overline{Z_C})^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) + 2\overline{Z_{Leq}}\overline{Z_C}(\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi)}}$$

Tout en sachant que :

$$(\cos^2\theta + \sin^2\theta) = 1$$

$$(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = 1$$

$$\cos\theta\cos\varphi = 1/2[\cos(\theta + \varphi) + \cos(\theta - \varphi)]$$

$$\sin\theta \sin\varphi = 1/2[\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta + \varphi)]$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

- **Les courants partiels transités par ligne à la charge**

$$I_{C1} = \frac{Z_{L1}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L1}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C2} = \frac{Z_{L2}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L2}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C3} = \frac{Z_{L3}}{Z_{Leq}} \cdot I_C = \frac{Z_{L3}}{Z_{Leq}} \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

1.7.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge et l'égaliser à zéro.

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_C}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi)\right]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) \left((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow Z_C = Z_{Leq}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne ($Z_C = Z_{Leq}$)

$$P_{C \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos \varphi$$

1.7.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_C}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi) \left((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \sin \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_c}{dZ_c} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_c)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_c)^2 + 2 Z_{Leq} Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_c^2)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_c)^2 + 2 Z_{Leq} Z_c \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = Z_{Leq}}$$

En remplaçant $\mathbf{Z_c}$ par $\mathbf{Z_{Leq}}$ dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{c \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{c \max} = \frac{E^2}{2 Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin \varphi$$

1.7.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer $\mathbf{Z_c}$ par $\mathbf{Z_{Leq}}$ dans l'expression du courant on aura :

$$I_{c \text{ crit}} = I_c(Z_c = Z_{Leq}) = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{c \text{ crit}} = \frac{E}{Z_{Leq} [2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

1.7.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer $\mathbf{Z_c}$ par $\mathbf{Z_{Leq}}$ dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{c \text{ crit}} = V_c(Z_c = Z_{Leq}) = \frac{Z_{Leq} E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$V_{c \text{ crit}} = \frac{E}{[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.8 Seconde phase de fonctionnement (perte de la ligne de transmission (3)).

I.8.1 Evaluation des courants transités à la charge

- Le courant total transité à la charge

$$\bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \cdot \bar{I}_C + \bar{V}_C$$

$$\bar{V}_C = \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

$$\bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \cdot \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

Sachant que :

$$Z_{Leq} = \frac{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}Z_{L2}} \right) \cdot Z_{L3}}{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}Z_{L2}} \right) + Z_{L3}} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L3}(Z_{L1} + Z_{L2})}$$

$$Z_{Leq} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L1}Z_{L3} + Z_{L2}Z_{L3}}$$

$$\Rightarrow \bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_{Leq} = Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) + \bar{Z}_C(\cos\varphi + j\sin\varphi)}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{(Z_{Leq}\cos\theta + Z_C\cos\varphi) + j(Z_{Leq}\sin\theta + Z_C\sin\varphi)}$$

L'expression du courant circulant à travers la charge en module sera :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq}\cos\theta + Z_C\cos\varphi)^2 + (Z_{Leq}\sin\theta + Z_C\sin\varphi)^2}}$$

Tout en sachant que :

$$(\cos\theta^2 + \sin\theta^2) = 1$$

$$(\cos\varphi^2 + \sin\varphi^2) = 1$$

$$\cos\theta \cos\varphi = 1/2[\cos(\theta + \varphi) + \cos(\theta - \varphi)]$$

$$\sin\theta \sin\varphi = 1/2[\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta + \varphi)]$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)\right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

- **Les courants partiels transités par ligne à la charge**

$$I_{C1} = \left[Z_{Leq} \cdot \left(\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{L3}} \right) + \left(\frac{Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right] \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C2} = \left[Z_{Leq} \cdot \left(\frac{1}{Z_{L2}} + \frac{1}{Z_{L3}} \right) + \left(\frac{Z_{L1} - Z_{L3}}{Z_{L1}} \right) \right] \cdot \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C3} = 0$$

1.8.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge et l'égaliser à zéro.

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_C}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) \left((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi) \right) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_C^2)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = Z_{Leq}}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne (**$Z_C = Z_{Leq}$**)

$$P_{C \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos \varphi$$

1.8.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_C}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi) \left((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \sin \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_c^2)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_c)^2 + 2 Z_{Leq} Z_c \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi)(Z_{Leq}^2 - Z_c^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_c^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_c = Z_{Leq}}$$

En remplaçant Z_c par Z_{Leq} dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{c \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{c \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin \varphi$$

I.8.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer Z_c par Z_{Leq} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{c \text{ crit}} = I_c(Z_c = Z_{Leq}) = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{c \text{ crit}} = \frac{E}{Z_{Leq} [2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.8.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_c par Z_{Leq} dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{c \text{ crit}} = V_c(Z_c = Z_{Leq}) = \frac{Z_{Leq} E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$V_{c \text{ crit}} = \frac{E}{[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.9 Troisième phase de fonctionnement (perte des lignes de transmission (2) et (3)).

I.9.1 Evaluation du courant transité à la charge

$$\bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \cdot \bar{I}_c + \bar{V}_c$$

$$\bar{V}_c = \bar{Z}_c \bar{I}_c$$

$$\bar{E} = \bar{Z}_{Leq} \cdot \bar{I}_C + \bar{Z}_C \bar{I}_C$$

Sachant que :

$$Z_{Leq} = \frac{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}+Z_{L2}} \right) \cdot Z_{L3}}{\left(\frac{Z_{L1}Z_{L2}}{Z_{L1}+Z_{L2}} \right) + Z_{L3}} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L3}(Z_{L1} + Z_{L2})}$$

$$Z_{Leq} = \frac{Z_{L1}Z_{L2}Z_{L3}}{Z_{L1}Z_{L2} + Z_{L1}Z_{L3} + Z_{L2}Z_{L3}}$$

$$\Rightarrow \bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{Leq} + \bar{Z}_C} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \bar{Z}_{Leq} = Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) \\ \bar{Z}_C = Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi) \end{cases}$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2} + \bar{I}_{C3} \quad (\text{tous les courants passant par la ligne(1)})$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{C1} \quad \text{car} \quad (\bar{I}_{C2} = \bar{I}_{C3} = 0)$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{Z_{Leq}(\cos\theta + j\sin\theta) + Z_C(\cos\varphi + j\sin\varphi)}$$

$$\bar{I}_C = \frac{\bar{E}}{(Z_{Leq}\cos\theta + Z_C\cos\varphi) + j(Z_{Leq}\sin\theta + Z_C\sin\varphi)}$$

L'expression du courant circulant à travers la charge en module sera :

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2(\cos^2\theta + \sin^2\theta) + (Z_C)^2(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) + 2Z_{Leq}Z_C(\cos\theta\cos\varphi + \sin\theta\sin\varphi)}}$$

Tout en sachant que :

$$(\cos^2\theta + \sin^2\theta) = 1$$

$$(\cos^2\varphi + \sin^2\varphi) = 1$$

$$\cos\theta\cos\varphi = 1/2[\cos(\theta + \varphi) + \cos(\theta - \varphi)]$$

$$\sin\theta\sin\varphi = 1/2[\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta + \varphi)]$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2Z_{Leq}Z_C\cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_C = \frac{E}{\sqrt{(Z_{Leq})^2 \left[1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right]}}$$

$$I_C = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

1.9.2 Evaluation de la puissance active maximale délivrée à la charge

Pour trouver la puissance active maximale délivrée à la charge, il suffit de dériver l'expression de la puissance active par rapport à l'impédance de la charge et l'égaliser à zéro.

$$P_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = E^2 \cos \varphi \left[\frac{Z_C}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) \left((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) + (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi) - (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \cos \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \cos \varphi)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \cos \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2)}{\left[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi) \right]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \cos \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = Z_{Leq}}$$

Le maximum de la puissance active est atteint pour une valeur de l'impédance de la charge égale à celle de la ligne ($\mathbf{Z_C = Z_{Leq}}$)

$$P_{C \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \cos \varphi$$

$$P_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \cos \varphi$$

I.9.3 Evaluation de la puissance réactive maximale délivrée à la charge

C'est le même développement que pour la puissance active.

$$Q_C = \frac{Z_C E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = E^2 \sin \varphi \left[\frac{Z_C}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)]} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi) ((Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) - (2Z_C + 2Z_{Leq} \cos(\theta - \varphi)) (Z_C E^2 \sin \varphi)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$= \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) + (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) + (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi) - 2(Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi) - (2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)) (E^2 \sin \varphi)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dQ_C}{dZ_C} = \left[\frac{(Z_{Leq})^2 (E^2 \sin \varphi) - (Z_C)^2 (E^2 \sin \varphi)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = \left[\frac{(E^2 \sin \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2)}{[(Z_{Leq})^2 + (Z_C)^2 + 2 Z_{Leq} Z_C \cos(\theta - \varphi)]^2} \right]$$

$$\frac{dP_C}{dZ_C} = 0 \Rightarrow (E^2 \sin \varphi) (Z_{Leq}^2 - Z_C^2) = 0 \Rightarrow Z_{Leq}^2 - Z_C^2 = 0 \Rightarrow \mathbf{Z_C = Z_{Leq}}$$

En remplaçant Z_C par Z_{Leq} dans l'expression de la puissance réactive on aura :

$$Q_{C \max} = \frac{Z_{Leq} E^2}{(Z_{Leq})^2 \left(1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}} \right) \cos(\theta - \varphi) \right)} \sin \varphi$$

$$Q_{C \max} = \frac{E^2}{2Z_{Leq} [1 + \cos(\theta - \varphi)]} \sin \varphi$$

I.9.4 Expression du courant critique

Il suffit de remplacer Z_C par Z_{Leq} dans l'expression du courant on aura :

$$I_{C \text{ crit}} = I_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

$$I_{C \text{ crit}} = \frac{E}{Z_{Leq} [2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

I.9.5 Expression de la tension critique

Il suffit de remplacer Z_C par Z_{Leq} dans l'expression de la tension on aura :

$$V_{C \text{ crit}} = V_C(Z_C = Z_{Leq}) = \frac{Z_{Leq} E}{Z_{Leq} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{Leq}}{Z_{Leq}}\right) \cos(\theta - \varphi)}}$$

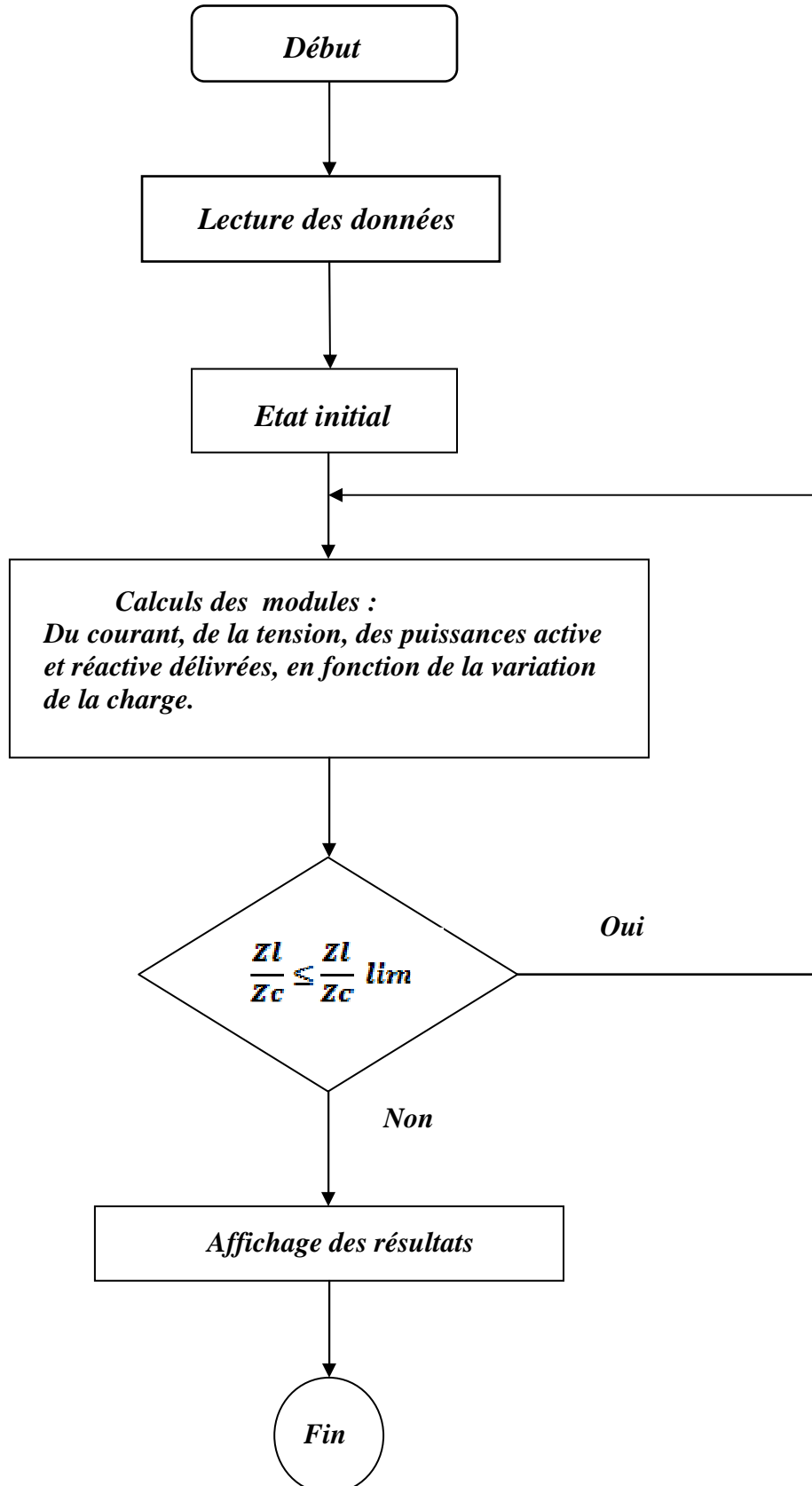
$$V_{C \text{ crit}} = \frac{E}{[2(1 + \cos(\theta - \varphi))]}$$

ANNEXES II

II. Organigrammes des programmes informatiques.

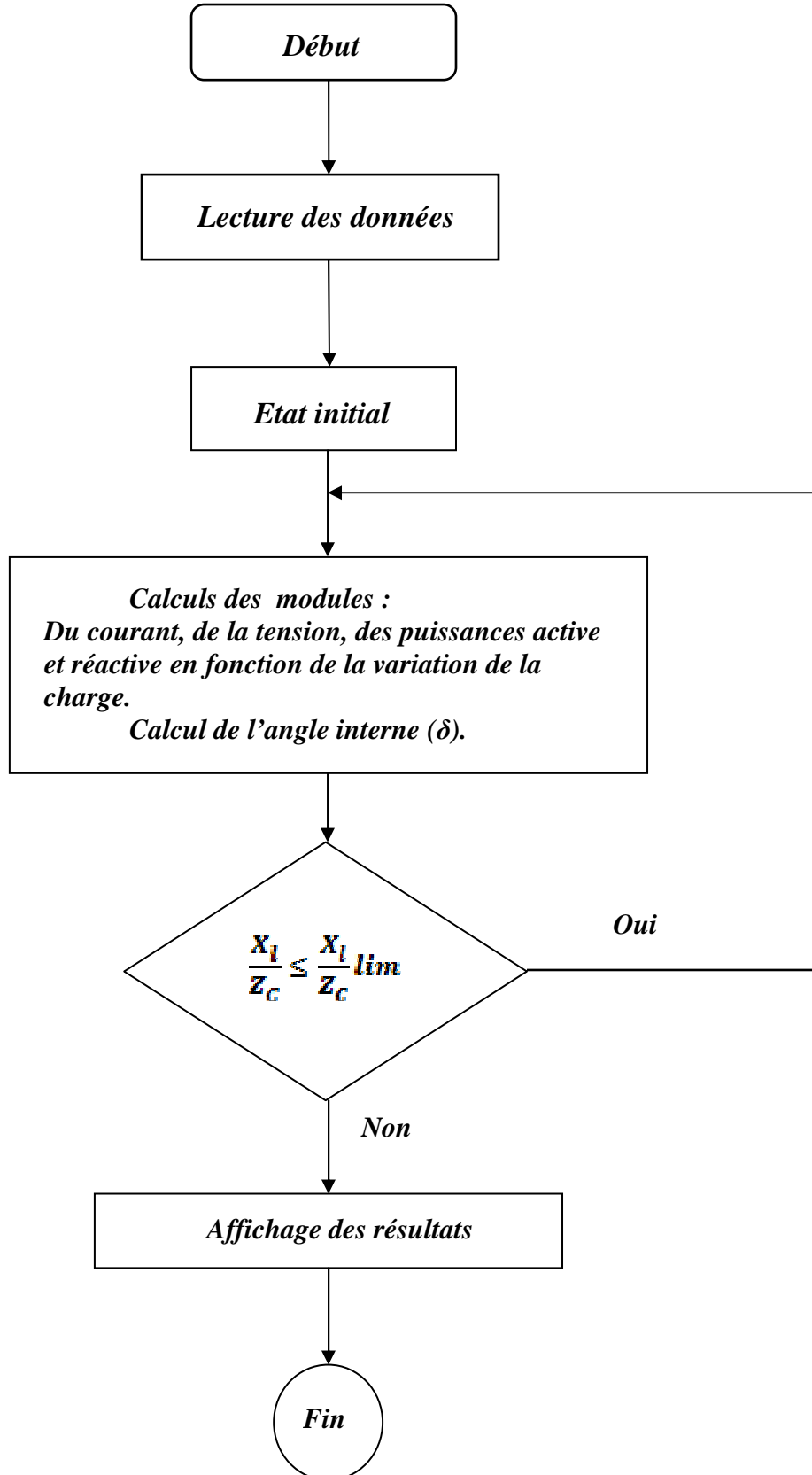
II.1 Organigramme du programme informatique No 1.

Cas d'une ligne et d'une charge impédante.

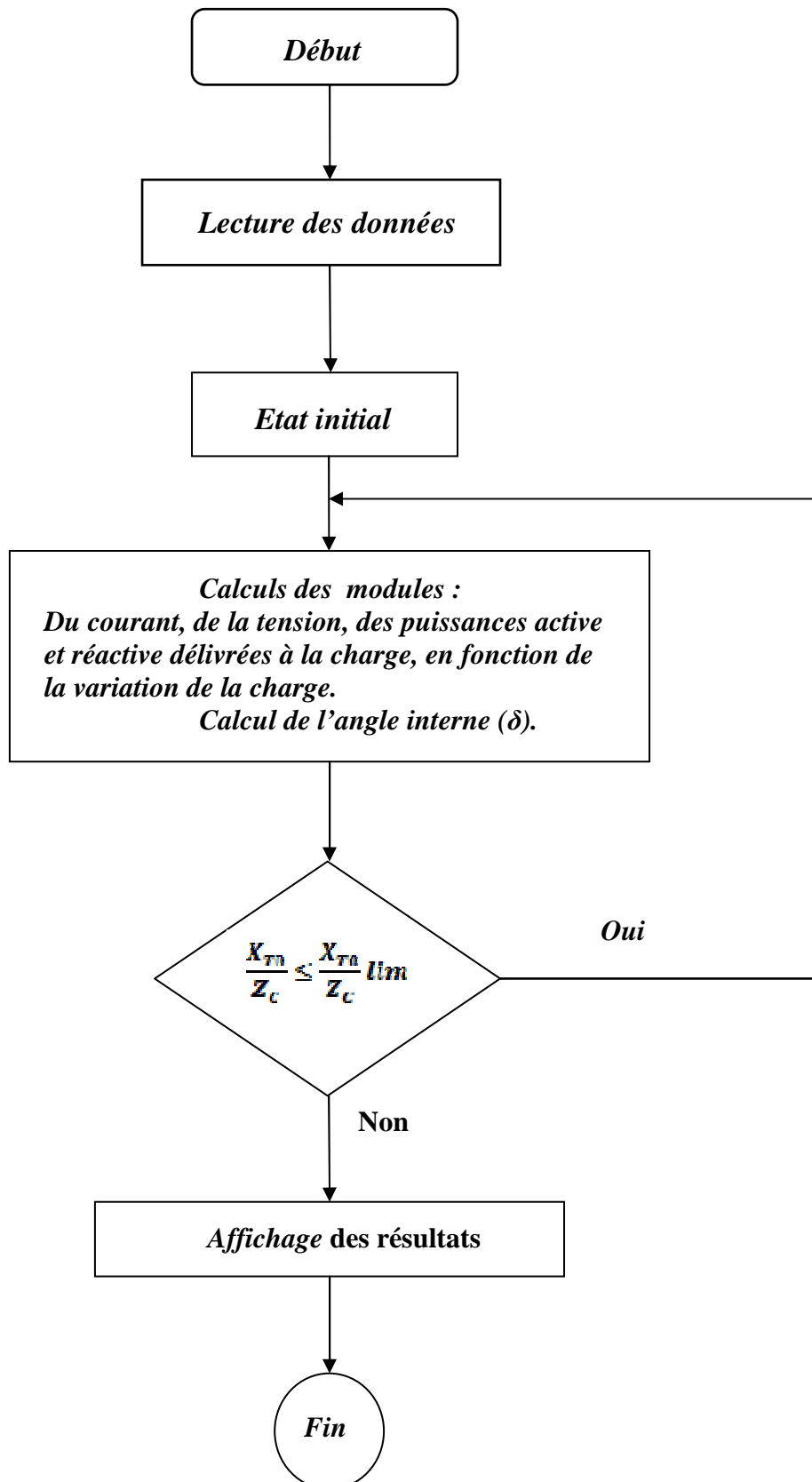


II.2 Organigramme des programmes informatiques établis pour la mise en évidence de la perte de synchronisme.

**II.2.1 Organigramme du programme informatique No 2.
Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante.**

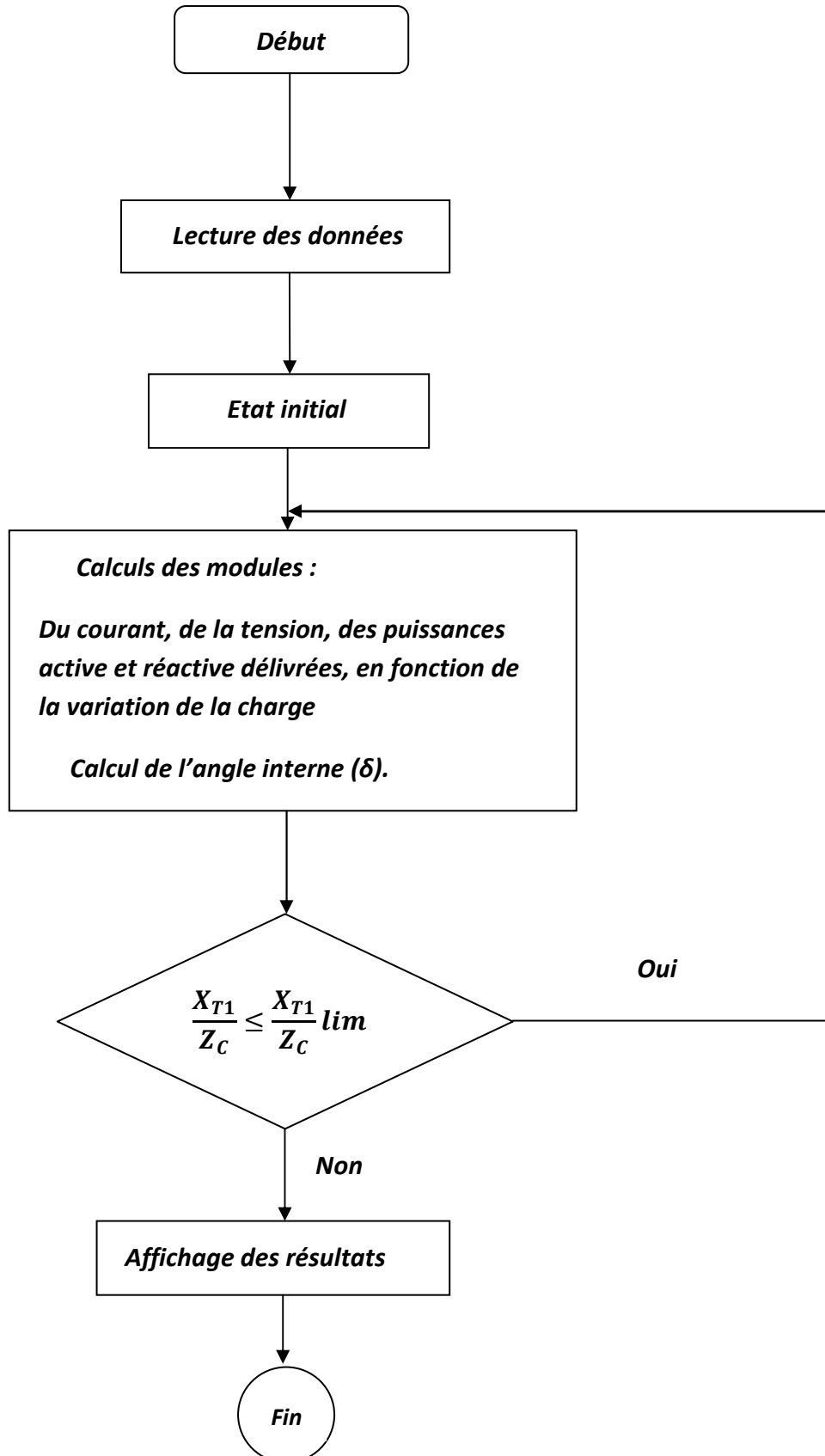


II.2.2 Organigramme du programme informatique No 3.
Cas d'une ligne inductive, et d'une charge impédante en introduisant la réactance synchrone de l'alternateur.



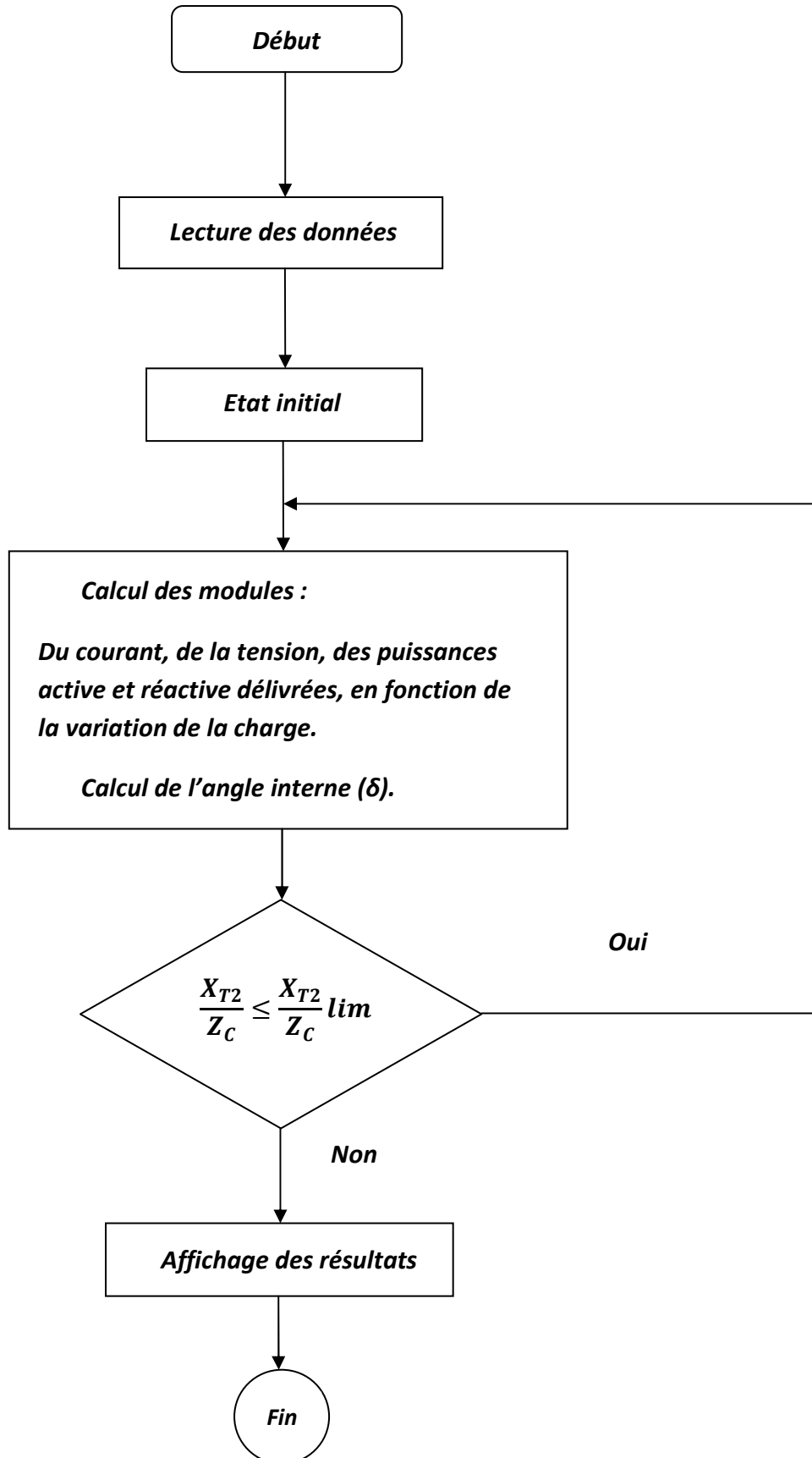
II.2.3 Organigramme du programme informatique No 4.

Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction des réactances de l'alternateur et du transformateur.



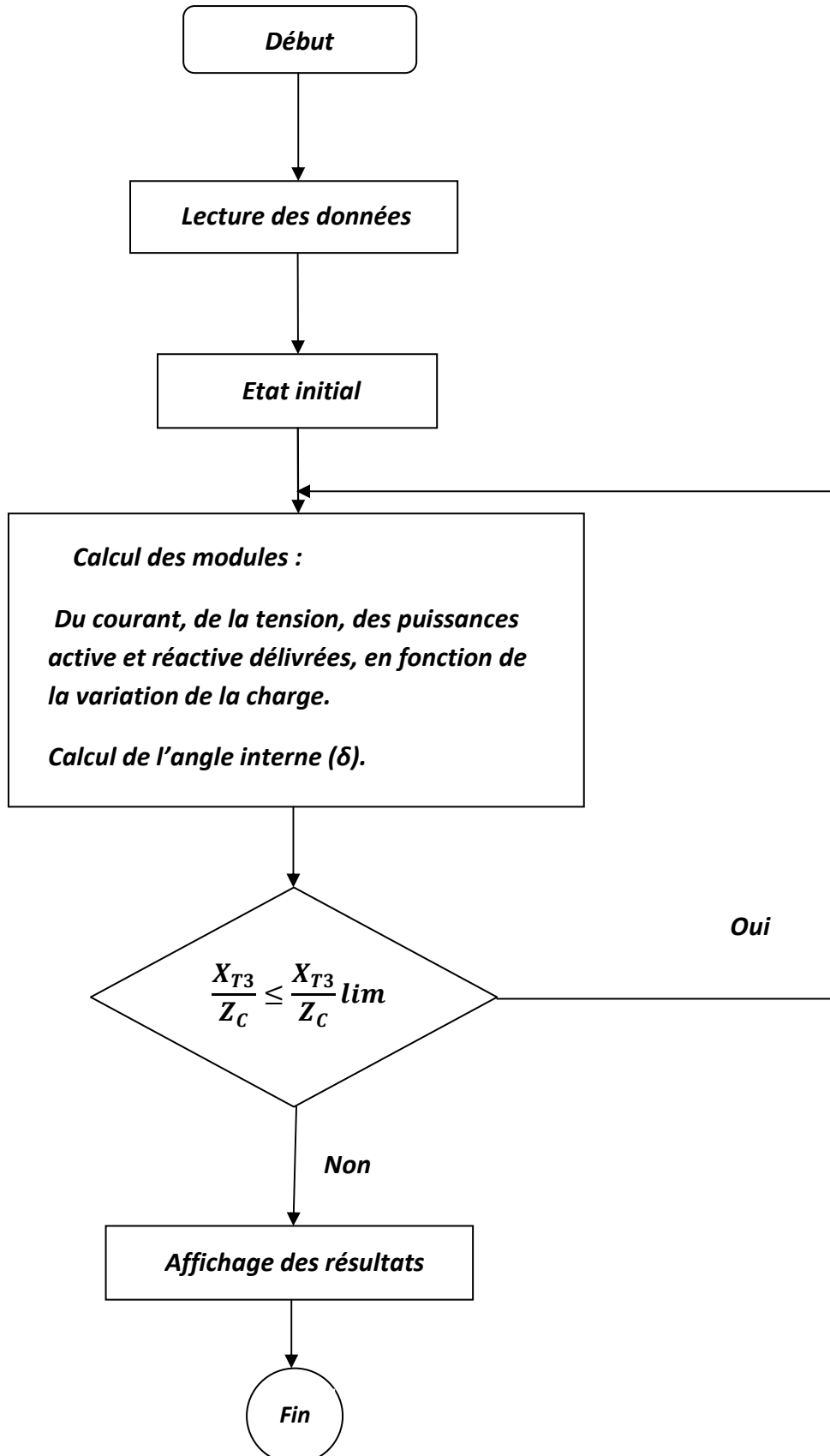
II.2.4 Organigramme du programme informatique No 5.

Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction de la compensation série locale (Xc1).

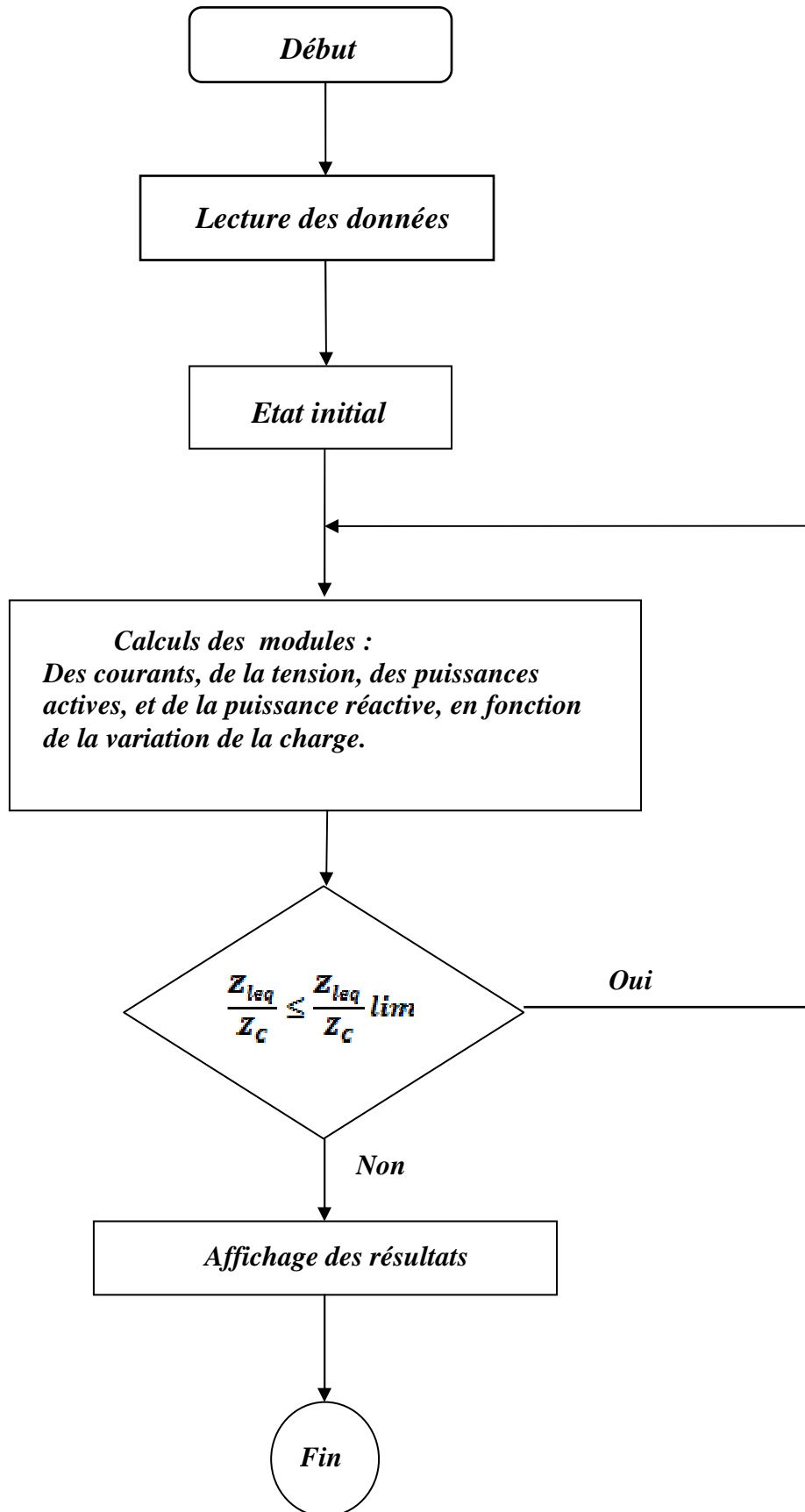


II.2.5 Organigramme du programme informatique No 6.

Cas d'une ligne inductive et d'une charge impédante avec introduction de la compensation série globale et locale ($X_{c1}+X_{c2}$).



II.3 Organigramme du programme informatique No 7.
Etude du phénomène des surcharges en cascade.



ANNEXE III

III. Valeurs numériques des paramètres utilisés

$$E=220 \text{ V}$$

$$R_l=10 \text{ } \Omega$$

$$X_l=100 \text{ } \Omega$$

$$\cos\varphi = 0.95$$

$$f = 50 \text{ Hz.}$$

$$X_S= 20 \text{ } \Omega$$

$$X_{T_r}=10 \text{ } \Omega.$$

$$X_{C1}=X_{C2}= 40 \text{ } \Omega$$

$$X_{T0}=120 \text{ } \Omega.$$

$$X_{T1}=130 \text{ } \Omega$$

$$X_{T2}=80 \text{ } \Omega$$

$$X_{T3}=40 \text{ } \Omega.$$

$$Z_{l1}=R_{l1}+jX_{l1}= 10 +j 100 \text{ } \Omega.$$

$$Z_{l2}=R_{l2}+jX_{l2}= 3 +j 30 \text{ } \Omega.$$

$$Z_{l3}=R_{l3}+jX_{l3}= 2 +j 20 \text{ } \Omega.$$

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **THEODORE WILDY & GILBERT SYBILLE**
"ELECTROTECHNIQUE"
QUATRIEME EDITION 'DE-BOECK', 2005
- [2] **N.OUERK**
"DETERMINATION DES INDICATEURS PERMETTANT D'EVALUER LA
STABILITE EN TENSION DES RESEAUX ELECTRIQUES"
Thèse de magister
2004 UMMTO
- [3] **PIERRE BORNARD**
"CONDUITE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION-TRANSPORT"
TRAITE TECHNIQUES DE L'INGENIEUR. DOCUMENT D-4080
- [4] **RTE FRANCE**
"LE MEMENTO DE LA SURETE DU SYSTEME ELECTRIQUE"
2004
DOCUMENT CONSULTABLE ET TELECHARGEABLE SUR LE SITE INTERNET:
www.RTE-france.com
- [5] **FRANCIS MILSANT**
"MACHINES ELECTRIQUES, TOME I"
"TRANSFORMATEURS ET RESEAUX ELECTRIQUES"
EDITIONS ELLIPSES, DEC 1990.
- [6] **PATRICK BASTARD, DANIEL FARGUE, PHILIPPE LAURIER**
BERNARD MATHIEU, MURIEL NICOLAS, PHILIPPE ROOS
"L'ELECTRICITE"
"VOYAGE AU CŒUR DU SYSTEME"
EDITIONS EYROLLES 2000
- [7] **VALENTIN CRASTAN**
"RESEAUX ELECTRIQUES-TOMEI"
EDITIONS HERMES 2006
- [8] **ANCYCLOPEDIE MULTIMEDIA WIKIPEDIA**
DOCUMENT CONSULTABLE SUR LE SITE INTERNET:
http://fr.wikipedia.org/wiki/Poste_C3Alectrique/Pourquoi_des_postes_.C3.Alectriques_haute_tension
- [9] **D.N. EWART**
"AUTOMATIC GENERATION CONTROL - PERFORMANCE UNDER
NORMAL CONDITIONS"
SYSTEMS ENGINEERING FOR POWER: STATUS AND PROSPECTS, CONF.
750867, U.S. ENERGY RESEARCH AND DEVELOPMENT ADMINISTRATION, HENNIKER,
N.H., AUGUST 17-22, 1975
- [10] **N FLATABO, J.A.FOOSNAES, AND T.O. BERNTSEN**
"TRANSFORMERS TAP SETTING IN OPTIMAL LOAD FLOW"
REF 51 49' IEEE TRANS.VOL.PAS-104, No. 6, PP.1356-1362, JULY 1985. OLTC
- [11] **T.PETERSON**
"REACTIVE POWER COMPENSATION"
ASEA publications NK
02-3005 E, MAY 1983

- [12] **MICHEL CRAPPE**
"STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES, SAUVEGARDE DES RESEAUX ELECTRIQUES"
EDITIONS HERMES-LAVOISIER, 2003.
- [13] **ABB INFORMATION PUBLICATIONS**
"AN INTRODUCTION TO ABB SERIES CAPACITORS"
SEPTEMBER 9, 1991
- [14] **C.V. THIO & J.B. DAVIES**
"NEW SYNCHRONOUS COMPENSATORS FOR THE NELSON RIVER HVHC SYSTEM-PLANNING REQUIREMENT AND SPECIFICATIONS"
IEEE TRANS.ON POWER DELIVERY, VOL. 6, NO 2, PP.922-928, APRIL 1991
- [15] **CIGRE REPORT**
"STATIC VAR COMPENSATORS"
PREPARED BY WG 38-01, TASK FORCE No. 2, PARIS, 1986
- [16] **F.BOURGIN-G.TESTUD & B.HEILBORNN-J.VERSEILLE**
ELECTRICITE DE FRANCE (EDF)
"PRESENT PRACTICES AND TRENDS ON THE FRENCH POWER SYSTEM TO PREVENT VOLTAGE COLLAPSE"
IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 8, No3. AUGUST 1993
- [17] **A.J.WOOD AND B.F. WALLENBERG**
"POWER GENERATION, OPERATION, AND CONTROL"
JHON WILEY & SONS, 1984
- [18] **JEAN CLAUDE SABONNADIERE & NOUREDINE HADJSAID**
"LIGNES ET RESEAUX ELECTRIQUES II"
METHODES D'ANALYSES DES RESEAUX ELECTRIQUES"
HERMES, LAVOISIER 2007
- [19] **Jean-Pierre CLERFEUILLE** **Sylvain VITET** **Cyril LEBREVELEC**
EDF Exploitation EDF pôle Industrie division EDF pôle Industrie division
Du système électrique Recherche et Développement. Recherche et Développement
"PLAN DE DEFENSE CONTRE LES INCIDENTS MAJEURS"
TRAITE TECHNIQUES DE L'INGENIEUR , REF D-4807.
- [20] **MARC STUBBE & JACQUES DEUSE**
"SECURITE, SAUVEGARDE ET SIMULATION NUMERIQUE"
LAVOISIER 2003
- [21] **PIERRE BORNARD & MICHEL PAVARD**
"RESEAUX D'INTERCONNEXION ET DE TRANSPORT: REGLAGE ET FONCTIONNEMENT"
TRAITE TECHNIQUES D'INGENIEURS D-4090
- [22] **T.QUOC TUAN, J.FANDINO, N. HADJ SAID, J. C. SABONNADIERE.**
"EMERGENCY LOAD SHEDDING TO AVOID RISKS OF VOLTAGE INSTABILITY USING INDICATORS"
IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 9, No, 1, FEBRUARY 1994

- [23] **"WEST AFRICAN POWER POOL"**
MANUEL D'EXPLOITATION DES RESEAUX INTERCONNECTES DE L'EEEOA
JUILLET 2007
- [24] **THIERY VAN CUTSEM**
"FONCTIONNEMENT DEGRADE DES GRANDS SYSTEMES D'ENERGIE
ELECTRIQUE"
JOURNEE D'ETUDES SEE-SRBE, LILLE, 31 MAI 2007
UNIVERSITE DE LIEGE ET FNRS
DEPT ELECTRICITE, ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE
(INSTITUT MONTEFIORE)
- [25] **C.COMON M.TROTIGNAN E CORRADI G.BORTANI M.STUBBE J DEUSE.**
EDF Cesi TRACTABEL
"MAJOR INCIDENTS ON THE FRENCH ELECTRIC SYSTEM/ POTENTIALLY AND
CURATIVE MEASURES STUDIES"
- [26] **NICHOLAS W. MILLER, ROBERT D'AQUILLA, KEBEDE M. JIMMA,**
MICHAEL T. SHEEHAN, GORDON L. COMEGYS.
"VOTAGE STABILITY OF THE PUGET SOUND SYSTEM UNDER ABNORMALLY
COLD WEATHER CONDITIONS"
IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 8, No,3 ,AUGUST 1993
- [27] **PHILIPPE FERRACCI**
"LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE"
"CAHIER TECHNIQUE No 199-GROUPE SCHNEIDER-ELECTRIC, OCTOBRE 2001"
- [28] **M. BEGOVIC, D. FULTON, M.R. GONZALES, J. GOOSSENS, E.A. GURO, R.W. HAAS,**
CF.HENVILLE, G.MANCHUR, GL. MICHAEL, R.C.PASTORE,
J.POSTFOROOSH, G.L.SCHMITT, J.B.WILLIAMS, K. ZIMMERMAN
"SUMMARY OF SYSTEM PROTECTION AND VOLTAGE STABILITY"
- [29] **"ANCYCLOPEDIE WIKIPEDIA"**
DOCUMENT CONSULTABLE SUR LE SITE INTERNET: <http://fr.wikipedia.org>
Mot clé : Pannes de courant, Les grands incidents dans les réseaux électriques.
- [30] **MICHEL AGUET**
"SURETE DES GRANDS RESEAUX ELECTRIQUES"
CATALOGUE, JUILLET 2005
- [31] **"VOLTAGE INSTABILITY IN INTERCONNECTED POWER SYSTEMS,**
A SIMULATION APPROACH"
W.R. LACHS & D. SUTANTO
UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES, P.O.BOX 1 KENSINGTON, AUSTRALIA
- [32] **H.E.LOKAY AND V.BURTHYK,**
"APPLICATION OF UNDER FREQUENCY RELAYS FOR AUTOMATIC
LOAD SHEDDING"
IEEE TRANS, VOL. PAS-87, PP. 776_783, MARCH 1968
- [33] **T. J. E MILLER**
"REACTIVE POWER CONTROL IN ELECTRIC SYSTEMS"
WILEY- INTERSCIENCE
- [34] **B. M. WEEDY**
"ELECTRIC POWER SYSTEMS"
JHON WILEY & SONS, THIRD EDITION, 1979