

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par

**IMANE BELABDI
NEDJMA SOUMEUR**

Thème

Modélisation et Commande d'une Interconnexion Électrique THT Asynchrone Équipée D'un Dispositif HVDC

M.OUTAHAR BENSIDHOUM

MCA, UMMTO, Président

AMMAR HAMACHE

MCB, UMMTO, Encadreur

SAID DJENOUNNE

PROFESSEUR, UMMTO, Examineur

M.ACHOUR TOUAT

MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements



Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Amar Hamach pour son entière disposition, ces orientations éclairées, sa patience et sa gentillesse.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

Nos sentiments de profonde gratitude vont à nos professeurs qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à nos chers parents pour leur encouragement, leur patience et leur grand soutien durant toutes ses années d'études.

Enfin, on tient à remercier tous nos amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de cette préparation.

Dédicaces

À la mémoire de mes grands parents

Puisse dieu les accueillir dans son vaste paradis

À celui qui a garni mes chemins avec force et lumière... mon très cher père

À la plus belle perle du monde... ma tendre mère

À mes frères Karim, Madjid, Sofiane

Je leurs souhaite tout le succès... tout le bonheur

À toute ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

À ma chère binôme pour la sœur agréable qu'elle était et qu'elle restera

À tous mes amis spécialement Imad, Célia, Omar, Katia, Massi et Meriem

Pour une sincérité si merveilleuse... jamais oubliable, je leurs souhaite plein de réussite et de bonheur.

À toute personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Amablement

Je dédie ce modeste travail

Imane

Dédicaces

À mes grands parents

Puisse dieu les protéger pour moi

À celui qui a garni mes chemins avec force et lumière... mon très cher père

À la plus belle perle du monde... ma tendre mère

À mes sœurs Amal, Nabila, Chahineze

À mon beau frère Madjid

À ma petite nièce adorée Asmaa

Je leurs souhaite tout le succès... tout le bonheur

À toute ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

À ma chère binôme pour la sœur agréable qu'elle était et qu'elle restera

À tous mes amis spécialement Omar, Katia, Massi, Imad, Celia et Meriem

Pour une sincérité si merveilleuse... jamais oubliable, je leurs souhaite plein de réussite et de bonheur.

À toute personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie...

Amablement

Je dédie ce modeste travail

Nedjma

Liste des figures et tableaux

- Figure1.1.** Structure générale d'un réseau électrique. (Page 3)
- Figure2.1.** Schéma simplifié du VSC-HVDC. (Page 12)
- Figure2.2.** Circuit triphasé du système HVDC. (Page 13)
- Figure2.3.** Schéma du circuit AC de l'émetteur. (Page 14)
- Figure2.4.** schéma du circuit AC du récepteur. (Page 15)
- Figure2.5.** Circuit équivalent du bus continu et répartition des puissances. (Page 22)
- Figure2.6.** Schéma bloc de la partie continue. (Page 23)
- Figure3.1.** Puissance active de référence (côté récepteur). (Page 26)
- Figure3.2.** Puissance réactive de référence (côté récepteur). (Page 26)
- Figure3.3.** Puissance réactive de référence (côté émetteur). (Page 26)
- Figure3.4.** Structure globale de commande du système HVDC. (Page 27)
- Figure3.5.** Schéma bloc de régulation de la tension continue. (Page 28)
- Figure3.6.** Structure de commande par retour d'état. (Page 31)
- Figure3.7.** Réponse du HVDC pour le test 1. (Page 33)
- Figure3.8.** Réponse du HVDC pour le test 2. (Page 34)
- Figure3.9.** Réponse du HVDC pour le test 3. (Page 35)
- Figure3.10.** Réponse du HVDC pour le test 4. (Page 36)
- Figure3.11.** Réponse du HVDC pour le test 1. (Page 42)
- Figure3.12.** Réponse du HVDC pour le test 2. (Page 44)
- Figure3.13.** Réponse du HVDC pour le test 3. (Page 45)
- Figure3.14.** Réponse du HVDC pour le test 4. (Page 46)

Tableaux

- Tableau.2.1.** Notations des paramètres du système. (Page 13)
- Tableau.2.2.** Notations concernant les puissances mises en jeu dans le bus continu. (Page 22)

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux électrique et position de problème.	
1.1. Introduction	3
1.2. Structure d'un réseau électrique.....	3
1.3. Missions.....	5
1.3.1. Transport de l'énergie électrique des zones de production aux zones de consommation ..	5
1.3.2. Interconnexion avec les réseaux voisins	5
1.3.3. Rentabilité	6
1.3.4. Stabilité des machines	5
1.3.5. Qualité de service	6
1.4. Conduites conventionnelle d'un réseau électrique	7
1.4.1. Coupures d'alimentation	7
1.4.2. Variations de la tension	8
1.4.3. Variation de fréquence et stabilité du réseau	9
1.5. Inconvénients de la conduite conventionnelle	10
1.6. Problématique	10
1.7. Conclusion.....	11
Chapitre 2: Modélisation du système HVDC	
2.1. Introduction	12
2.2. Modélisation du système	12
2.2.1. Modèle triphasé du sous-système alternatif	14
2.2.2. Modèle d-q du sous système alternatif	17
2.2.2.1. Modèle d-q du HVDC côté émetteur	17
2.2.2.2. Modèle d-q du HVDC côté récepteur	19
2.2.2.3. Modèle d-q global du sous système alternatif	21
2.2.3. Modèle de la ligne à courant continu	22
2.3. Conclusion.....	24
Chapitre 3: Commande du système HVDC	
3.1. Introduction	25
3.2. Cahier des charges	25
3.3. Schéma globale de commande	27
3.4. Commande de la tension du bus continue	28
3.4.1. Synthèse du régulateur	2
3.5. Commande des courants	29
3.5.1. Commande par retour d'état	28
3.5.1.1. Résultat de simulation	32
3.5.2. Commande par modes glissants.....	37
3.5.2.1. Synthèse de la commande par mode glissant	37

Sommaire

3.5.2.2. Résultats de simulation.....	42
3.5. 3.Analyse et discussion	47
3.6. Conclusion.....	47
Conclusion générale	48
Annexe	

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Il devient de plus en plus difficile d'obtenir des endroits de passage pour construire de nouvelles lignes de transport ou de distribution. Pour ces raisons, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans autant compromettre leur fiabilité et stabilité.

L'évolution des réseaux électriques fut marquée, durant les dernières années, par de nouvelles stratégies de conception, d'exploitation et de contrôle. En effet, la solution adoptée, par les plupart des pays, pour faire face au problème de croissance rapide de la demande d'énergie électrique se résume dans les points suivants :

- La mise en service de nouvelles centrales plus puissantes,
- Le maillage de plus en plus de réseau de transport et de distribution,
- L'échange d'énergie entre pays via les interconnexions intercontinentales.

Cette complexité de structure est à la base des problèmes actuels rencontrés dans la conduite, essentiellement, l'affaiblissement de la capacité des réseaux à garder la stabilité suite à un défaut. Cela a favorisé le recours aux moyens de contrôle pour accroître les marges de sécurité face aux instabilités qui pourraient être provoquées par les perturbations et contingences qui pourraient s'étendre sur tout le réseau de transport. Par ailleurs, la gestion d'un tel réseau requiert l'insertion de systèmes sophistiqués pour la commande du flux de puissance. Actuellement, la majorité des systèmes utilisés en conduite des réseaux électriques tels que les transformateurs à prises réglables ou les compensateurs de puissance réactive ne sont pas suffisants du fait que leur manœuvre est assurée par des dispositifs électromécaniques causant une lenteur de réponse et des contraintes économiques.

Cela fait qu'actuellement et depuis les années quatre-vingt-dix du siècle dernier, beaucoup de recherches sont lancées afin d'une part, améliorer le rendement de ces systèmes de commande et d'autre part, développer des dispositifs de commande modernes à l'instar des HVDC (High Voltage Direct Current), une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité à haute tension en courant continu.

Introduction générale

Dans le présent travail, nous allons faire l'étude complète de ce dispositif HVDC afin de montrer ses capacités incontestables dans le domaine du transport d'électricité sur de longues distances et l'interconnexion.

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présentera quelques généralités sur les réseaux électriques à savoir leurs structures générales, leurs fonctionnements ainsi que les différents incidents et contingences les plus rencontrés dans le domaine du transport d'énergie électrique. Quelques solutions conventionnelles seront données, suivies d'une solution moderne concrétisée par le dispositif HVDC.

Le deuxième chapitre exposera, d'une manière explicite, la modélisation mathématique du dispositif en vue de commander et simuler son fonctionnement.

Le dernier chapitre sera consacré à la synthèse de deux lois de commande à savoir commande par retour d'état et commande à structure variable (par mode glissant) pour piloter le HVDC dans la réalisation du cahier des charges.

Enfin, le mémoire sera achevé par une conclusion générale suivie de quelques perspectives.

1.1. Introduction :

Le présent chapitre expose quelques généralités concernant les réseaux électriques en termes de: mission, constitution, fonctionnement et conduite conventionnelle. De plus, ce chapitre cite les problèmes de fonctionnement relatifs à la conduite conventionnelle et propose quelques techniques modernes de conduite. C'est le dispositif HVDC (High Voltage Direct Current), une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu haute tension, son principal intérêt est de permettre le transport d'électricité sur de longues distances.

1.2. Structure d'un réseau électrique :

La figure.1.1 représente la structure générale d'un réseau électrique maillé avec les différents niveaux de tension (cas du réseau algérien) [1].

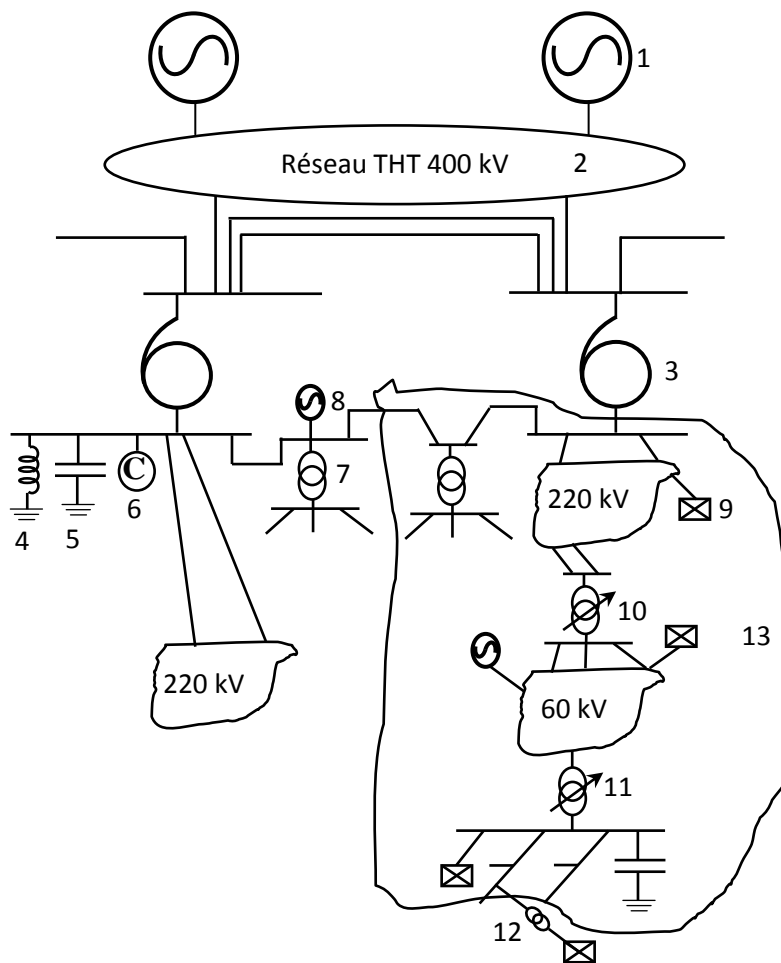


Figure.1.1. Structure générale d'un réseau électrique.

Un réseau électrique est un ensemble d'ouvrages électriques permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes. Ces derniers permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre par l'intermédiaire de transformateur.

Le réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

La figure.1.1 montre les principaux constituants d'un réseau électrique actuel, à savoir :

1- Le groupe : il produit de la puissance active et fournit ou absorbe de la puissance réactive.

Les plus puissants sont raccordés au réseau THT (400 kV) et fixent le cadre global de la tension.

2- Le réseau 400 kV : c'est un réseau suffisamment maillé pour permettre d'acheminer la puissance réactive à des distances relativement lointaines.

3- L'autotransformateur : il assure le passage du niveau de tension 400 kV vers le niveau 220 kV. Il est doté de prises réglables qui permettent dans une certaine marge, de modifier la tension en aval.

4- La réactance inductive shunt : elle absorbe de la puissance réactive.

5- La réactance capacitive shunt: elle fournit de la puissance réactive.

6- Le compensateur synchrone : permet de faire l'un ou l'autre.

7- Le transformateur THT/HT : il assure le passage du niveau de tension 220 kV vers le niveau 60 kV (HT).

8- Le groupe de production décentralisée : il produit une puissance relativement faible souvent à base d'énergie renouvelable (hydraulique, éolienne, photovoltaïque).

9- La charge : représente les différents consommateurs du produit électricité qui peuvent être industriels, domestiques ou autres.

10- Le régleur en charge : cherche à maintenir une tension en aval constante en jouant sur la position des plots dont il est doté.

11- Le transformateur HT/MT : il assure le passage du niveau de tension 60 kV vers la moyenne tension (MT) 30 kV ou 10 kV selon qu'on est en zone rurale ou en ville.

12- Le transformateur MT/BT : il assure le passage du niveau de tension MT vers la basse tension (BT) 380 V.

13- Le réseau de répartition et de distribution : il assure la répartition de l'énergie par zone et la distribution pour alimenter les clients quelque soit leur nature, industrielle ou domestique.

1.3. Missions :

1.3.1. Transport de l'énergie électrique des zones de production aux zones de consommation :

L'énergie électrique est produite par de grosses unités industrielles appelées centrales électriques. Ces centrales se situent en général près des lieux de production des énergies primaires (barrages, gaz, réacteurs nucléaires, fermes éoliennes, etc.), souvent à proximité des axes de transport dans lesquels circulent ces mêmes énergies primaires ou auprès de cours d'eau qui servent au refroidissement des circuits des générateurs de vapeur.

La consommation de l'énergie électrique produite par les centrales est, en général, éloignée des lieux de production par conséquent, l'énergie doit être transportée sur de grandes distances entre lieux de production et de consommation. C'est le rôle du réseau de transport de l'énergie électrique (GRTE en Algérie).

1.3.2. Interconnexion avec les réseaux voisins :

L'interconnexion entre les réseaux de transport d'électricité sert à faire passer l'énergie d'un pays à l'autre. Son rôle principal est de venir en aide aux réseaux voisins lorsqu'il y a défaillance ou difficulté de gestion dans ceux-ci, et vice versa. Cela permet, bien-entendu, de mutualiser les ouvrages électriques des réseaux interconnectés afin de répondre à la moindre perturbation (ex. réseau maghrébin interconnecté ELTAM).

Quelques exemples de réseaux interconnectés peuvent être cités ci-dessous :

- Le réseau français, qui bénéficie d'une situation géographique privilégiée au sein de l'Europe, est connecté à six réseaux : allemand, italien, belge, espagnol, britannique (liaison à courant continu) et suisse. Ces interconnexions sont utilisées en priorité pour assurer le bon fonctionnement des réseaux de transport électriques des sept pays.

- Le réseau algérien est interconnecté aux réseaux marocain (ligne 400 kV Sidi Ali Boussidi – Bourdim) et tunisien (ligne 400 kV El Taref – Tigerouine). Ces interconnexions sont utilisées principalement à la stabilisation des trois réseaux dans le cas d'une perturbation sévère ou le transport d'énergie vers les réseaux déficitaires.

Les interconnexions constituent un préalable essentiel à l'émergence d'un marché régional de l'électricité. Le passage au palier 400 kV a donné effectivement un nouveau rôle commercial aux interconnexions électriques entre les pays du Maghreb. L'expérience des interconnexions entre la Libye, la Tunisie, l'Algérie et le Maroc d'une part et entre le Maroc et l'Espagne d'autre part constitue aujourd'hui un appui précieux pour les travaux relatifs à la construction d'un marché énergétique euromaghrébin prometteur.

1.3.3. Rentabilité :

La rentabilité d'un réseau électrique est définie grossièrement comme étant le bénéfice réalisé par les opérateurs d'électricité dans un marché d'électricité présentement très optimiste (augmentation sans cesse de la consommation). Toutefois, quelques gestionnaires de réseau privilégie le service public à la rentabilité ce qui en fait des sociétés très déficitaires (cas du réseau national).

1.3.4. Stabilité des machines :

Un système est stable s'il a tendance à continuer à fonctionner dans son mode normal en régime permanent et s'il a tendance à y revenir à la suite d'une perturbation prévue (enclenchement d'une inductance shunt), ou imprévue (défaut triphasé à la terre). Lors de la perturbation, la tension et la fréquence aux différents points du réseau peuvent varier significativement.

Un réseau électrique est stable s'il est capable, en régime permanent et à la suite d'une perturbation, de fournir la puissance qu'exigent les consommateurs tout en maintenant constantes et près des valeurs nominales la fréquence (image de la vitesse de rotation des alternateurs) et l'amplitude de la tension aux différents niveaux du réseau. Le réseau électrique doit fonctionner à une fréquence stabilisée autour de 50 Hz quasiment partout dans le monde, exception faite pour quelques pays (USA, Canada et Grande Bretagne) qui préfèrent une fréquence nominale de 60 Hz. Pour cela, les gestionnaires des réseaux doivent

veiller à ce que l'équilibre entre la puissance appelée et la puissance produite soit établi en permanence.

1.3.5. Qualité de service :

Le produit électricité comme tout produit commercial doit être de bonne qualité. Celle-ci est caractérisée par la continuité d'alimentation des consommateurs. Ajoutons à cela la tension et la fréquence qui doivent être dans les normes pour ne pas altérer le bon fonctionnement des charges (appareils industriels et ménagers, etc.).

1.4. Conduites conventionnelles d'un réseau électrique :

La conduite ou le pilotage d'un réseau est définie par les différentes actions à réaliser pour garantir une bonne qualité de service. L'opérateur de réseau dispose de moyens matériels et humains qu'il met face aux coupures d'alimentation (interruption de service) ainsi que les variations de tension et de fréquence.

1.4.1. Coupures d'alimentation : elles sont essentiellement dues au:

- déclenchement d'ouvrages (lignes et/ou postes) suite aux mauvaises conditions climatiques (tempête, neige, orage, givre, canicules, etc.), à la pollution des isolateurs, aux mauvais réglages des protections, aux appels brutaux de puissance, etc.
- sabotage ou la consignation qui reviennent aux mauvaises manœuvres, au manque d'expérience et de vigilance, à la sécurité inadéquate, à l'utilisation d'engins surdimensionnés, aux travaux, à l'absence de couloirs de servitudes, etc.
- marché dérégulé où l'implication d'un opérateur à assurer sa tranche, pour des raisons de concurrence, temporairement provoquer son retrait du marché ce qui engendre un déficit en production ou transport.

L'opérateur du réseau, pour pallier aux coupures d'alimentation, prend les mesures nécessaires, entre autres:

- le dédoublement de lignes et transformateurs au sein du même poste afin que la défaillance d'une ligne ou d'un transformateur ne conduise pas à la perte d'une tranche de consommation.

- l'enterrement des lignes et le blindage des postes afin de rendre les ouvrages insensibles aux mauvaises conditions climatiques et à l'abri du sabotage.
- le maillage de tous les niveaux de tension afin d'assurer la contribution de tous les ouvrages à l'apaisement de la défaillance de l'un des ouvrages.

1.4.2. Variations de la tension : les chutes de tension sont dues à :

- la surcharge des lignes et transformateurs en réactif.
- Les défauts sévères survenant au niveau des jeux de barres des postes d'évacuation des grosses centrales car, ils induisent des déclenchements ou défaillances d'équipements (lignes, postes, automatismes de protection... etc.)
- l'appel brutal et imprévu de puissance.
- La vétusté des ouvrages.

Les surtensions sont dues généralement à une exploitation très restreinte des ouvrages (cas du réseau sud-algérien).

Les techniques de conduite utilisées se résument en :

- la construction de nouvelles centrales de production afin de contribuer à atténuer les conséquences des défaillances et supporter le niveau de tension, étant donné que les centrales constituent le dispositif de réglage primaire de tension.
- la compensation capacitive shunt par batteries de condensateurs raccordés aux nœuds sentinelles déterminées par une étude de planification à moyen terme. Cette technique corrige le facteur de puissance du réseau et réduit significativement les pertes de transport-distribution dont souffrent les exploitants de réseaux.
- la compensation selfique shunt par inductances (selfs) raccordées aux nœuds sentinelles déterminés par une étude de planification à long terme.
- l'utilisation de transformateurs HT/MT dotés de régleurs en charge. Ceux-ci assurent un réglage de tension par gradins dans une plage de variation relativement réduite.

- L'utilisation des compensateurs synchrones flottant sur le réseau (tournent sans produire de puissance active). Ils sont utilisés dans le cas de saturation des centrales en termes de réactif.

1.4.3. Variation de fréquence et stabilité du réseau :

Les variations de la fréquence reflètent l'état d'équilibre entre production et consommation. Le maintien d'une valeur fixe normalisée est une première nécessité des exploitants de réseaux.

Les causes directes de ces variations sont :

- la courbe de charge mal maîtrisée. En effet, la principale difficulté n'est pas liée au transport mais à la production qui doit correspondre à tout instant à la consommation qui est souvent très fluctuante et imprévisible.
- les défauts sévères (courts-circuits mono ou triphasés aux jeux de barres groupe ou transformateur) qui représentent les perturbations les plus sévères qu'un réseau électrique puisse subir.

Les techniques de conduite utilisées se résument en :

- la réalisation d'interconnexions puissantes entre le réseau et ses voisins afin de lui venir en aide en cas de défaillance.
- la mobilisation de la réserve chaude (ensembles des groupes prêts à débiter instantanément dans le réseau) pour couvrir la courbe de charge et maintenir la fréquence étant donné que le groupe est un régulateur primaire de fréquence.
- L'utilisation des PSS (Power System Stabilizers) qui sont des régulateurs secondaires de fréquence.
- Le délestage de la tranche critique de consommation. Cela consiste à interrompre volontairement l'alimentation de plusieurs consommateurs pour rétablir rapidement l'équilibre entre la production et la consommation du réseau. Il s'agit d'une mesure de sauvegarde destinée à éviter les risques d'effondrement de la fréquence qui pourraient entraîner la coupure de l'ordre du brownout ou blackout (le plus agressif de l'histoire est celui du 31 juillet 2012 qui a frappé l'Inde et a privé 670 millions personnes du courant pendant 15 heures).

1.5. Inconvénients de la conduite conventionnelle :

Les techniques conventionnelles citées plus haut souffrent de la lenteur de réponse des appareils conventionnels, l'extension des délais de construction et de mise en service des nouveaux ouvrages sur des années et du coût très élevé des investissements (dépenses colossales pendant des années). Ajoutons à cela, les difficultés techniques de réalisation, l'encombrement foncier et les problèmes écologiques.

1.6. Problématique :

Devant cette situation de compromis entre service public et coût d'investissement, les recherches dans le domaine du transport d'électricité ont abouti aux techniques modernes de conduite des réseaux électriques ; les FACTS (acronyme de Flexible AC Transmission systems) pour le transport à courant alternatif et HVDC (acronyme de High Voltage Direct Current transmission systems) pour le transport à courant continu. Ces ouvrages utilisent les convertisseurs de l'électronique de puissance pilotés par des techniques modernes et sophistiquées de commande. Ces dispositifs modernes de commande des réseaux électriques agissent sur les paramètres physiques des lignes dans le but d'augmenter leurs capacités de transport ou de les rendre fonctionnelles près de leurs limites thermiques ou de stabilité.

Le transport d'électricité sur de très grandes distances est devenu plus avantageux en courant continu qu'en courant alternatif. En effet, des études ont montré qu'il était avantageux de recourir au courant continu lorsqu'il s'agissait de transporter l'électricité sur des distances allant au-delà de 500 km.

Les lignes à courant continu n'ayant pas de réactance, sont donc capables de faire transiter plus de puissance que celles à courant alternatif avec des conducteurs de même section. Toutefois, on reproche au HVDC de générer des harmoniques qui nécessitent un filtrage robuste et un système de compensation de la puissance réactive très important, aux deux extrémités de la ligne.

Dans cette étude, on s'intéressera au HVDC qui est une solution préférable à celle des FACTS car elle permet de [2] :

- Réaliser des interconnexions entre réseaux asynchrones (fonctionnant à fréquences différentes).
- Réaliser des interconnexions sous-marines.
- Limiter les pertes actives et les courants de défauts.

- Réduire les préoccupations écologiques.

1.7. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, les notions de bases du réseau électrique ont été exposées suivies de la mission, les composants de base et leurs fonctionnements, les défaillances et leurs causes directes, les techniques de conduite et leurs insuffisances. Ce chapitre pose la problématique de l'étude qui consiste à utiliser une technique moderne de transport d'électricité à courant continu, à savoir le HVDC pour ses avantages incontestables comparé aux FACTS.

2.1. Introduction :

Grâce à sa capacité de transmission, sa plage de puissance relativement élevée et son système de commande sophistiqué, le HVDC est considéré un dispositif de transport d'électricité moderne et très flexible.

Le présent chapitre donnera une vision claire des composantes principales du HVDC. De plus, le HVDC à deux sources de tension VSC (acronyme de Voltage Sourced Converter) et une ligne de transport à courant continu sera modélisé. Par la suite, le schéma fonctionnel du système global sera établi.

La figure 2.1 représente un schéma simplifié du HVDC.

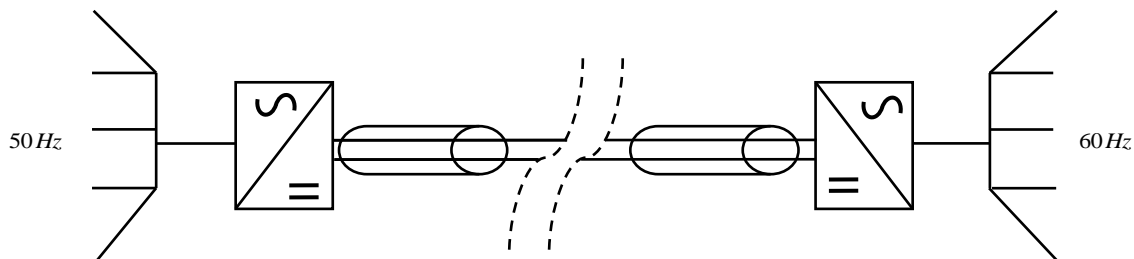


Figure.2.1. Schéma simplifié du VSC-HVDC.

2.2. Modélisation du système :

La figure 2.2 représente le circuit triphasé de base du système HVDC, où [2]-[3]-[4]-[5] :

- Les réseaux amont et aval sont agrégés et remplacés par des équivalents de Thévenin composés de sources de tension triphasées équilibrées en série avec leurs inductances synchrones équivalentes.
- La ligne à courant continu, souvent un câble, est représentée par son modèle en π qui comporte deux condensateurs shunt, une résistance et une inductance de fuite. Les capacités des condensateurs shunt incluent l'effet capacitif du câble et les capacités des condensateurs de filtrage propres aux convertisseurs.
- Les deux convertisseurs, ici des onduleurs de tension à absorption sinusoïdale de courant, sont représentés par deux convertisseurs de puissance statiques à gains unitaires.

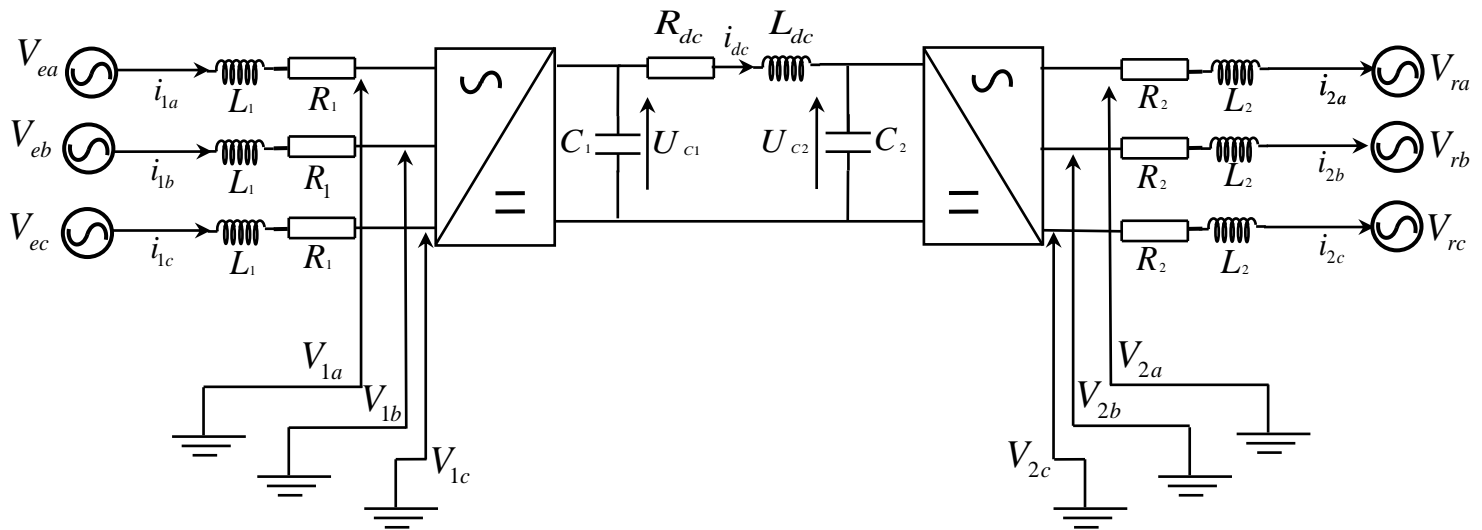


Figure.2.2. Circuit triphasé du système HVDC.

Le tableau ci-dessous donne la signification des grandeurs représentées sur la figure 2.2.

V_{ea}, V_{eb}, V_{ec}	Tension triphasée équivalente du réseau en amont.
V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}	Tension triphasée côté redresseur.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tension triphasée équivalente du réseau en aval.
V_{2a}, V_{2b}, V_{2c}	Tension triphasée côté onduleur.
i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}	Courant triphasé en amont
i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}	Courants triphasé en aval.
$R_1 + j\omega_1 L_1$	Impédance équivalente du réseau en amont
$R_2 + j\omega_2 L_2$	Impédance équivalente du réseau en aval
C_1, C_2	Capacités des condensateurs de la partie continue
U_{c1}, U_{c2}	Tensions aux bornes de la ligne continue
i_{dc}	Courant continu
L_{dc}, R_{dc}	Inductance et résistance de la ligne continue
ω_1, ω_2	Pulsations des réseaux en amont et en aval

Tableau.2.1. Notations des paramètres du système.

2.2.1. Modèle triphasé du sous-système alternatif :

La figure 2.3 représente le schéma équivalent du circuit AC de la partie émettrice.

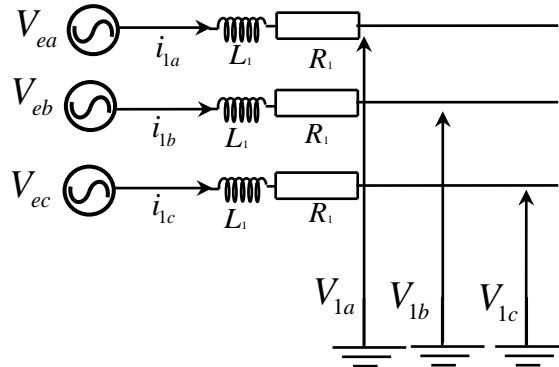


Figure.2.3. Schéma du circuit AC de l'émetteur.

Après avoir donné le schéma équivalent du circuit AC de la partie émettrice, il y a lieu d'écrire les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement de la dite partie. Pour cela, la loi de Kirchhoff en courant alternatif triphasé est appliquée au circuit de la figure 2.3. cela permet d'écrire, par rapport à la phase 'a' :

$$V_{ea} - R_1 i_{1a} - L_1 \frac{di_{1a}}{dt} - V_{1a} = 0 \tag{2.1}$$

Par rapport aux deux autres phases 'b' et 'c', on obtient :

$$V_{eb} - R_1 i_{1b} - L_1 \frac{di_{1b}}{dt} - V_{1b} = 0 \tag{2.2}$$

$$V_{ec} - R_1 i_{1c} - L_1 \frac{di_{1c}}{dt} - V_{1c} = 0 \tag{2.3}$$

En résolvant les équations (2.1), (2.2) et (2.3), par rapport aux dérivées des courants de phase, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} i_{1a} - \frac{1}{L_1} V_{1a} + \frac{1}{L_1} V_{ea} \\ \frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} i_{1b} - \frac{1}{L_1} V_{1b} + \frac{1}{L_1} V_{eb} \\ \frac{di_{1c}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} i_{1c} - \frac{1}{L_1} V_{1c} + \frac{1}{L_1} V_{ec} \end{cases} \tag{2.4}$$

Le système d'équations (2.4) peut se réécrire sous forme matricielle comme suit :

$$\dot{\mathbf{X}}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{X}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{U}_e + \mathbf{W}_e \tag{2.5}$$

où : les matrices \mathbf{A}_e et \mathbf{B}_e représentent, respectivement, la matrice d'état et la matrice de commande. Elles sont données par :

$$\mathbf{A}_e = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} \end{pmatrix} ; \quad \mathbf{B}_e = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_1} \end{pmatrix} .$$

Les vecteurs: $\mathbf{X}_e, \mathbf{U}_e$ et \mathbf{W}_e représentent respectivement, le vecteur d'états, le vecteur d'entrées et le vecteur des termes de forçage. Ils sont données par :

$$\mathbf{X}_e = \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{U}_e = \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \\ V_{1c} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{W}_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} V_{ea} \\ \frac{1}{L_1} V_{eb} \\ \frac{1}{L_1} V_{ec} \end{bmatrix} .$$

La figure 2.4 représente le schéma du circuit triphasé du récepteur.

Après avoir donné le schéma équivalent du circuit AC de la partie réceptrice, il y a lieu d'écrire les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement de la dite partie. Pour cela, la loi de Kirchhoff en courant alternatif triphasé est appliquée au circuit de la figure 2.4.

Cela permet d'écrire, par rapport à la phase 'a' :

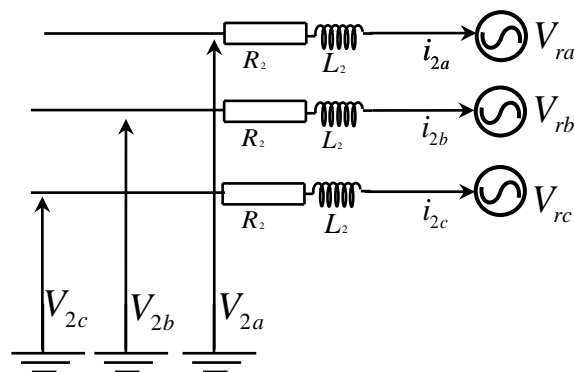


Figure.2.4. Schéma du circuit AC du récepteur.

$$V_{2a} - R_2 i_{2a} - L_2 \frac{di_{2a}}{dt} - V_{ra} = 0 \quad (2.6)$$

Par rapport aux deux autres phases 'b' et 'c', on obtient :

$$V_{2b} - R_2 i_{2b} - L_2 \frac{di_{2b}}{dt} - V_{rb} = 0 \quad (2.7)$$

$$V_{2c} - R_2 i_{2c} - L_2 \frac{di_{2c}}{dt} - V_{rc} = 0 \quad (2.8)$$

En résolvant les équations (2.6), (2.7) et (2.8), par rapport aux dérivées des courants de phase, on trouve :

$$\begin{cases} \frac{di_{2a}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_{2a} + \frac{1}{L_2} V_{2a} - \frac{1}{L_2} V_{ra} \\ \frac{di_{2b}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_{2b} + \frac{1}{L_2} V_{2b} - \frac{1}{L_2} V_{rb} \\ \frac{di_{2c}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} i_{2c} + \frac{1}{L_2} V_{2c} - \frac{1}{L_2} V_{rc} \end{cases} \quad (2.9)$$

Le modèle AC du récepteur est donc :

$$\dot{\mathbf{X}}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{X}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{U}_r + \mathbf{W}_r \quad (2.10)$$

avec :

$$\mathbf{A}_r = \begin{pmatrix} -\frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_r = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} \end{pmatrix}.$$

Les vecteurs: \mathbf{X}_r , \mathbf{U}_r et \mathbf{W}_r sont :

$$\mathbf{X}_r = \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}_r = \begin{bmatrix} V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W}_r = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_2} V_{ra} \\ -\frac{1}{L_2} V_{rb} \\ -\frac{1}{L_2} V_{rc} \end{bmatrix}.$$

2.2.2. Modèle d-q du sous système alternatif :

Dans sa forme alternative triphasée, le modèle d'état décrit par (2.5) et (2.10) ne peut pas être exploité à des fins d'asservissement du fait que les grandeurs électriques sont à fréquence relativement élevée. De plus, les convertisseurs génèrent des harmoniques côté DC et AC qui nécessitent l'intégration de filtres passe-bas dans le système de conversion d'énergie. Ces derniers rejettent toutes les fréquences supérieures au seuil de coupure ce qui aurait un effet d'atténuation sur les grandeurs électriques (impédance fictive). Afin de contourner ce problème, il est nécessaire d'établir un modèle plus pertinent dans le repère synchrone où les grandeurs utiles seraient continues ou à gabarit fréquentielle bas.

Le Passage d'un système triphasé à un système biphasé s'effectue par la transformation de Park (dite transformation dans le repère synchrone), celui-ci est exprimé dans le repère tournant d-q où les grandeurs utiles seraient continues. Cette transformation se fait en deux étapes (voire annexe A).

2.2.2.1. Modèle d-q du HVDC côté émetteur :

Le passage des coordonnées (a, b, c) aux coordonnées (d, q) est réalisé par le biais des relations suivantes :

$$\mathbf{X}_{edq} = P_{Park} \mathbf{X}_e \quad (2.11)$$

$$\mathbf{X}_e = P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{edq} \quad (2.12)$$

avec :

$$\mathbf{X}_{edq} = \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{10} \end{bmatrix} ;$$

De même pour les autres vecteurs :

$$\mathbf{U}_e = P_{Park}^{-1} \mathbf{U}_{edq} ; \mathbf{W}_e = P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{edq} ,$$

avec :

$$\mathbf{U}_{edq} = \begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ V_{10} \end{bmatrix} ; \mathbf{W}_{edq} = \begin{bmatrix} W_{1d} \\ W_{1q} \\ W_{10} \end{bmatrix}$$

$$P_{Park} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}; \text{ et}$$

$$P_{Park}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

D'après (2.5), et en exploitant (2.11) et (2.12), on peut écrire :

$$\frac{d(P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{edq})}{dt} = \mathbf{A}_e P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{edq} + \mathbf{B}_e P_{Park}^{-1} \mathbf{U}_{edq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{edq} \quad (2.13)$$

En développant le terme $\frac{d}{dt}(P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{edq})$, l'équation (2.13) s'écrira:

$$\frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} \mathbf{X}_{edq} + P_{Park}^{-1} \frac{d\mathbf{X}_{edq}}{dt} = P_{Park}^{-1} \mathbf{A}_e \mathbf{X}_{edq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{B}_e \mathbf{U}_{edq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{edq} \quad (2.14)$$

En multipliant (2.14) à gauche par P_{Park} et en utilisant le fait que les matrices: \mathbf{A}_e , \mathbf{B}_e sont diagonales, celle-ci s'écrira:

$$P_{Park} \frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} \mathbf{X}_{edq} + \frac{d\mathbf{X}_{edq}}{dt} = \mathbf{A}_e \mathbf{X}_{edq} + \mathbf{B}_e \mathbf{U}_{edq} + \mathbf{W}_{edq} \quad (2.15)$$

Par ailleurs (voir annexe A),

$$P_{Park} \frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} = \mathbf{\Omega}_1 = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_1 & 0 \\ \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Donc l'équation (2.15) devient :

$$\dot{\mathbf{X}}_{edq} = (\mathbf{A}_e - \mathbf{\Omega}_1) \mathbf{X}_{edq} + \mathbf{B}_e \mathbf{U}_{edq} + \mathbf{W}_{edq} \quad (2.17)$$

Finalement et après élimination de la troisième dimension relative à la composante homopolaire,

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{U}_1 + \mathbf{W}_1 \quad (2.18)$$

avec :

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega_1 \\ -\omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1} \end{pmatrix}.$$

Les vecteurs \mathbf{X}_1 , \mathbf{U}_1 et \mathbf{W}_1 sont donnés comme suit :

$$\mathbf{X}_1 = [i_{1d} \quad i_{1q}]^T; \quad \mathbf{U}_1 = [V_{1d} \quad V_{1q}]^T; \quad \mathbf{W}_1 = \left[\frac{1}{L_1} V_{ed} \quad \frac{1}{L_1} V_{eq} \right]^T.$$

2.2.2.2. Modèle d-q du HVDC côté récepteur :

Le passage des coordonnées (a, b, c) aux coordonnées (d, q) est réalisé par le biais des relations suivantes :

$$\mathbf{X}_{rdq} = P_{Park} \mathbf{X}_r \quad (2.19)$$

$$\mathbf{X}_r = P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{rdq} \quad (2.20)$$

avec :

$$\mathbf{X}_{rdq} = \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \\ i_{20} \end{bmatrix};$$

De même pour les autres vecteurs :

$$\mathbf{U}_r = P_{Park}^{-1} \mathbf{U}_{rdq}; \quad \mathbf{W}_r = P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{rdq}, \text{ avec :}$$

$$\mathbf{U}_{rdq} = \begin{bmatrix} V_{2d} \\ V_{2q} \\ V_{20} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W}_{rdq} = \begin{bmatrix} W_{2d} \\ W_{2q} \\ W_{20} \end{bmatrix}$$

$$P_{Park} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}; \text{ et}$$

$$P_{Park}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_2 + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}.$$

D'après (2.10), et en exploitant (2.19) et (2.20), on peut écrire :

$$\frac{d(P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{rdq})}{dt} = \mathbf{A}_r P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{rdq} + \mathbf{B}_r P_{Park}^{-1} \mathbf{U}_{rdq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{rdq} \quad (2.21)$$

En développant le terme $\frac{d}{dt}(P_{Park}^{-1} \mathbf{X}_{rdq})$, l'équation (2.21) s'écrira :

$$\frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} \mathbf{X}_{rdq} + P_{Park}^{-1} \frac{d\mathbf{X}_{rdq}}{dt} = P_{Park}^{-1} \mathbf{A}_r \mathbf{X}_{rdq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{B}_r \mathbf{U}_{rdq} + P_{Park}^{-1} \mathbf{W}_{rdq} \quad (2.22)$$

En multipliant (2.22) à gauche par P_{Park} et en utilisant le fait que les matrices: \mathbf{A}_r , \mathbf{B}_r sont diagonales, celle-ci s'écrira:

$$P_{Park} \frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} \mathbf{X}_{rdq} + \frac{d\mathbf{X}_{rdq}}{dt} = \mathbf{A}_r \mathbf{X}_{rdq} + \mathbf{B}_r \mathbf{U}_{rdq} + \mathbf{W}_{rdq} \quad (2.23)$$

Par ailleurs, (voir annexe A)

$$P_{Park} \frac{dP_{Park}^{-1}}{dt} = \mathbf{\Omega}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_2 & 0 \\ \omega_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Donc l'équation (2. 23) devient :

$$\dot{\mathbf{X}}_{rdq} = (\mathbf{A}_r - \mathbf{\Omega}_2) \mathbf{X}_{rdq} + \mathbf{B}_r \mathbf{U}_{rdq} + \mathbf{W}_{rdq} \quad (2.25)$$

Finalement et après élimination de la troisième dimension relative à la composante homopolaire,

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{U}_2 + \mathbf{W}_2 \quad (2.26)$$

Avec :

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} -\frac{R_2}{L_2} & \omega_2 \\ -\omega_2 & -\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{pmatrix}.$$

Les vecteurs \mathbf{X}_2 , \mathbf{U}_2 et \mathbf{W}_2 sont donnés comme suit :

$$\mathbf{X}_2 = [i_{2d} \quad i_{2q}]^T; \quad \mathbf{U}_2 = [V_{2d} \quad V_{2q}]^T; \quad \mathbf{W}_2 = \left[-\frac{1}{L_2} V_{rd} \quad -\frac{1}{L_2} V_{rq} \right]^T.$$

2.2.2.3. Modèle d-q global du sous système alternatif :

Le modèle global du sous système alternatif s'obtient par concaténation des deux modèles (2.18) et (2.26), il est donné sous la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{W} \tag{2.27}$$

Avec :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega_1 & 0 & 0 \\ -\omega_1 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \omega_2 \\ 0 & 0 & -\omega_2 & -\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} \end{pmatrix}.$$

Les vecteurs \mathbf{X} , \mathbf{U} et \mathbf{W} sont donnés comme suit :

$$\mathbf{X} = [i_{1d} \quad i_{1q} \quad i_{2d} \quad i_{2q}]^T; \quad \mathbf{U} = [V_{1d} \quad V_{1q} \quad V_{2d} \quad V_{2q}]^T; \quad \mathbf{W} = \left[\frac{1}{L_1} V_{ed} \quad \frac{1}{L_1} V_{ed} \quad -\frac{1}{L_2} V_{rd} \quad -\frac{1}{L_2} V_{rq} \right]^T$$

Il est à noter que le système (2.27) est linéaire carré à quatre entrées de commande concrétisées par les composantes synchrones des tensions générées par les deux convertisseurs. Les états sont les composantes synchrones des courants de ligne.

Sous sa forme (2.27), l'équation d'état comprend un terme \mathbf{W} de forçage qui représente le power flow naturel en l'absence du HVDC.

Etant donné que la matrice \mathbf{B} est diagonale de rang plein, le système (2.27) est commandable. De même, si on s'intéresse en sortie aux courants de ligne donc aux états, le système est évidemment observable.

2.2.3. Modèle de la ligne à courant continu :

La figure 2.5 représente le circuit équivalent du bus continu avec toutes les puissances mises en jeu.

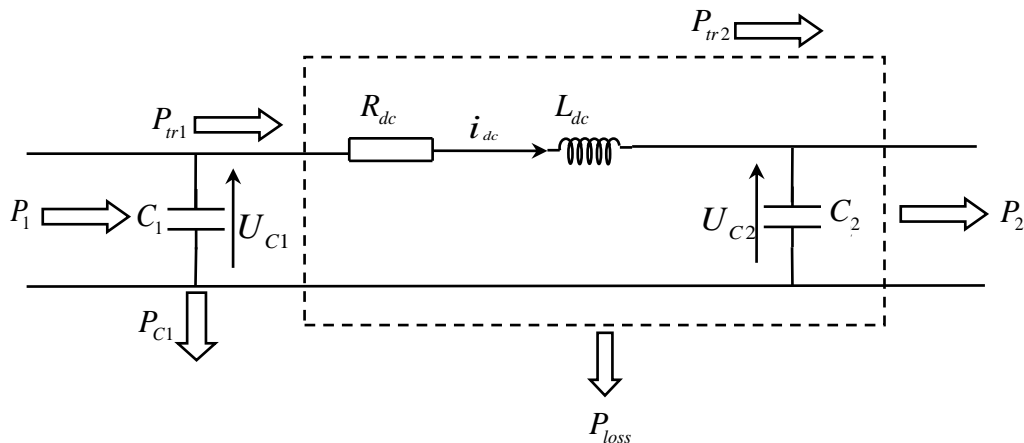


Figure.2.5. Circuit équivalent du bus continu et répartition des puissances.

Le tableau ci-dessous donne la signification des puissances représentées sur la figure 2.5.

P_1	Puissance transmise par le redresseur vers la partie continue
P_{tr1}	Puissance transiter dans la ligne continue
P_{tr2}	Puissance transiter dans la ligne continue
P_{C1}	Puissance de charge du condensateur C_1
P_{C2}	Puissance de charge du condensateur C_2
P_2	Puissance de sortie
P_{loss}	Pertes en ligne

Tableau.2.2. Notations concernant les puissances mises en jeu dans le bus continu.

Le principe de conservation des puissances électriques appliqué au schéma de la figure.2.5 conduit à l'équation suivante:

$$P_1 = P_{tr1} + P_{C1} \tag{2.28}$$

Où :

$$P_{tr1} = P_2 + P_{loss} \tag{2.29}$$

La puissance P_{C1} s'exprime en fonction de l'énergie E_{C1} emmagasinée dans le condensateur comme suit :

$$P_{C1} = \frac{dE_{C1}}{dt} \tag{2.30}$$

En exploitant le fait que $E_{C1} = \frac{1}{2}C_1U_{c1}^2$, (2.30) devient :

$$P_{C1} = \frac{1}{2}C_1 \frac{dU_{C1}^2}{dt} \tag{2.31}$$

Les équations (2.28) et (2.31) permettent d'écrire :

$$\frac{dU_{C1}^2}{dt} = \frac{2}{C_1}(P_1 - P_{tr1}) \tag{2.32}$$

Pour ce qui est de la grandeur de commande, le choix est porté sur P_1 car cette puissance appartient à l'opérateur du réseau (côté émetteur) et P_{tr1} est considérée comme une perturbation car elle appartient au réseau client (côté récepteur).

La figure 2.6 représente le schéma bloc de la partie continue.

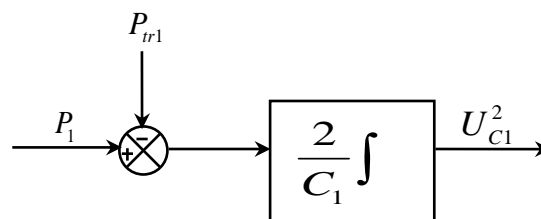


Figure.2.6. Schéma bloc de la partie continue.

Le modèle du bus continu (2.32) est linéaire dans la mesure où il concerne le carré de la tension aux bornes du condensateur côté émetteur et non pas la vraie valeur de cette tension. Dans l'hypothèse que la polarité de la tension ne change pas, les deux grandeurs évoluent de

la même manière. Autrement dit, réguler le carré de la tension assure la régulation de la tension.

2.3. Conclusion :

Au cours du présent chapitre concernant la modélisation du système HVDC, deux sous systèmes ont été considérés : le sous système alternatif et le sous système continu. Le modèle mathématique du sous système alternatif a été établi dans l'espace d'état, en exploitant d'une part les schémas équivalents des circuits triphasés côtés en amont et en aval de la ligne à courant continu et d'autre part, les lois de Kirchhoff en courant alternatif triphasé.

Pour rendre les grandeurs continues et simplifier la commande, le modèle obtenu a été projeté dans le repère synchrone d-q à l'aide de la transformation de Park, après quelques adaptations utiles. Le modèle obtenu dans le repère synchrone est multivariable linéaire continu à quatre états et quatre entrées de commande ; et comprenant un terme de forcing.

Quant au bus à courant continu, l'application du principe de conservation des puissances a permis d'obtenir un modèle du carré de la tension linéaire continu.

3.1. Introduction :

Le modèle du système HVDC obtenu au chapitre précédent servira à la synthèse de lois de commande pour conduire le système dans l'objectif de réaliser le cahier des charges ci-dessous.

3.2. Cahier des charges :

L'installation d'un système HVDC dans un système de transport électrique permet de :

- améliorer la capacité de transport du système ;
- garantir une marge de réactif suffisante ;
- rendre possible le raccordement des réseaux électriques asynchrones (à des fréquences différentes) ;
- assurer le transport sur de longues distances par des câbles sous-marins ;
- évacuer l'énergie produite dans les centrales d'énergie nouvelle et renouvelable (fermes éoliennes, panneaux photovoltaïques, centrales marémotrices, turbines émergées à courant océanique, etc.).

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressées au cas de raccordement de deux réseaux asynchrones fonctionnant à 50 Hz et 60 Hz. Nous allons simuler un système qui ressemble à la liaison électrique France – Grande Bretagne où le système français à 50 Hz (émetteur) envoie de l'électricité au système britannique à 60 Hz (récepteur). Le cahier des charges peut être résumé par :

- Les puissances actives et réactives reçues par le récepteur doivent suivre leurs consignes (voir figures 3.1 et 3.2) ;
- La puissance réactive émise par l'émetteur doit suivre sa consigne (voir figures 3.3);
- Les tensions alternatives de commandes doivent évoluer dans une bande centrée à la valeur nominale et dont la largeur est définie par l'opérateur ;
- Les tensions continues aux bornes de la ligne à courant continu doivent être maintenues proches de leurs valeurs nominales pour un fonctionnement sain des valves de puissance ;

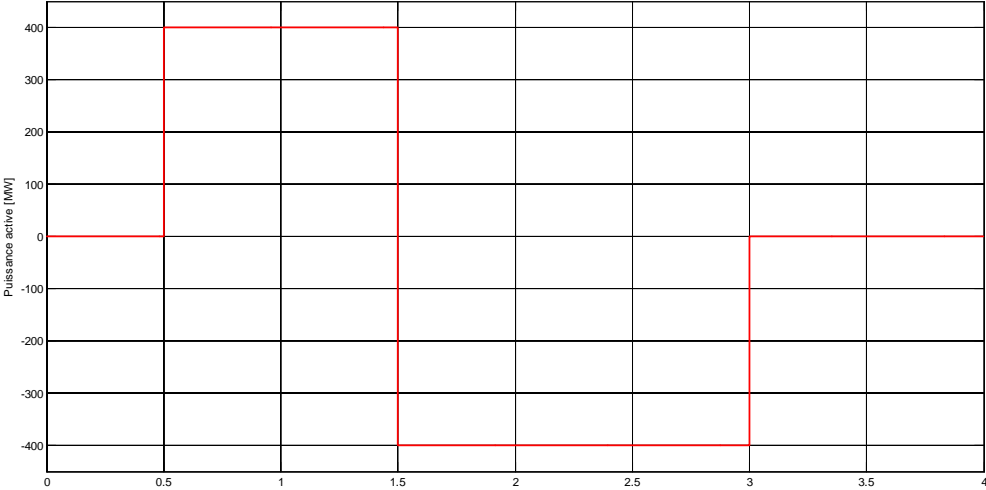


Figure.3.1. Puissance active de référence (côté récepteur).

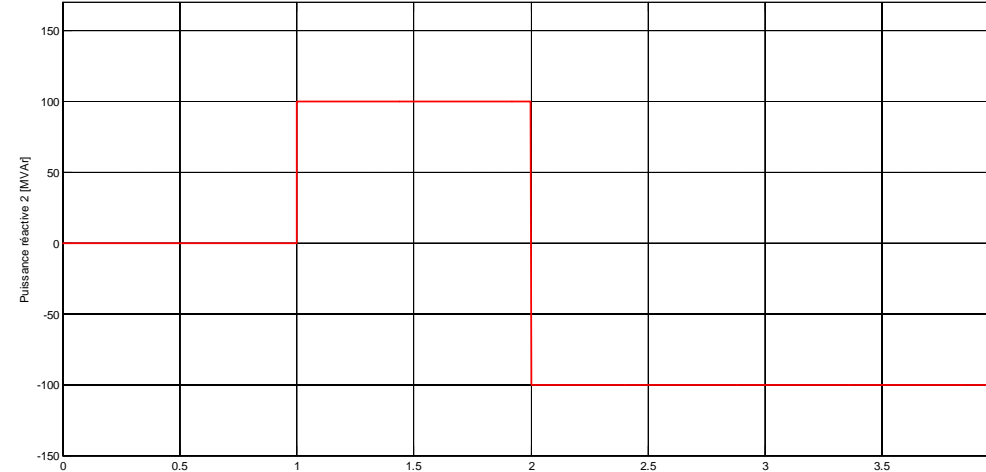


Figure.3.2. Puissance réactive de référence (côté récepteur).

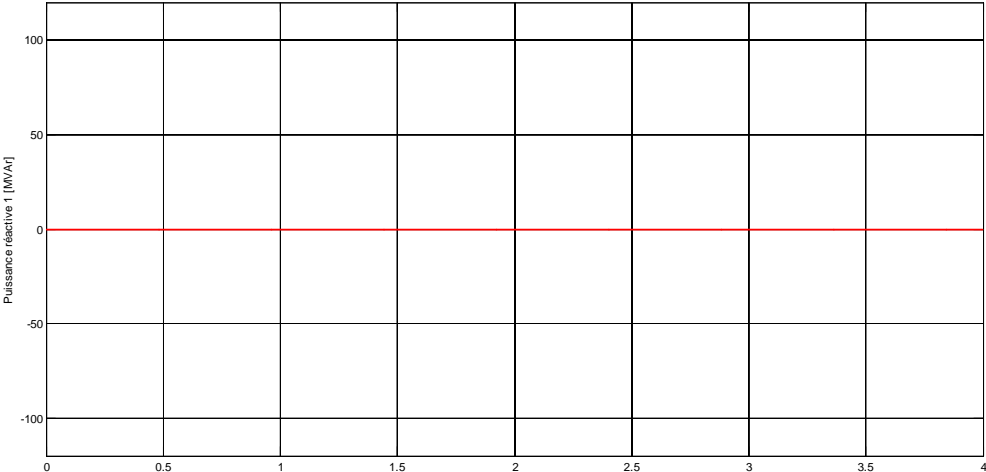


Figure.3.3. Puissance réactive de référence (côté émetteur).

Dans le présent chapitre, il est question de commander le système HVDC pour réaliser le cahier des charges donné plus haut.

3.3. Schéma global de commande :

La figure 3.4 schématise les deux systèmes de commande [5].

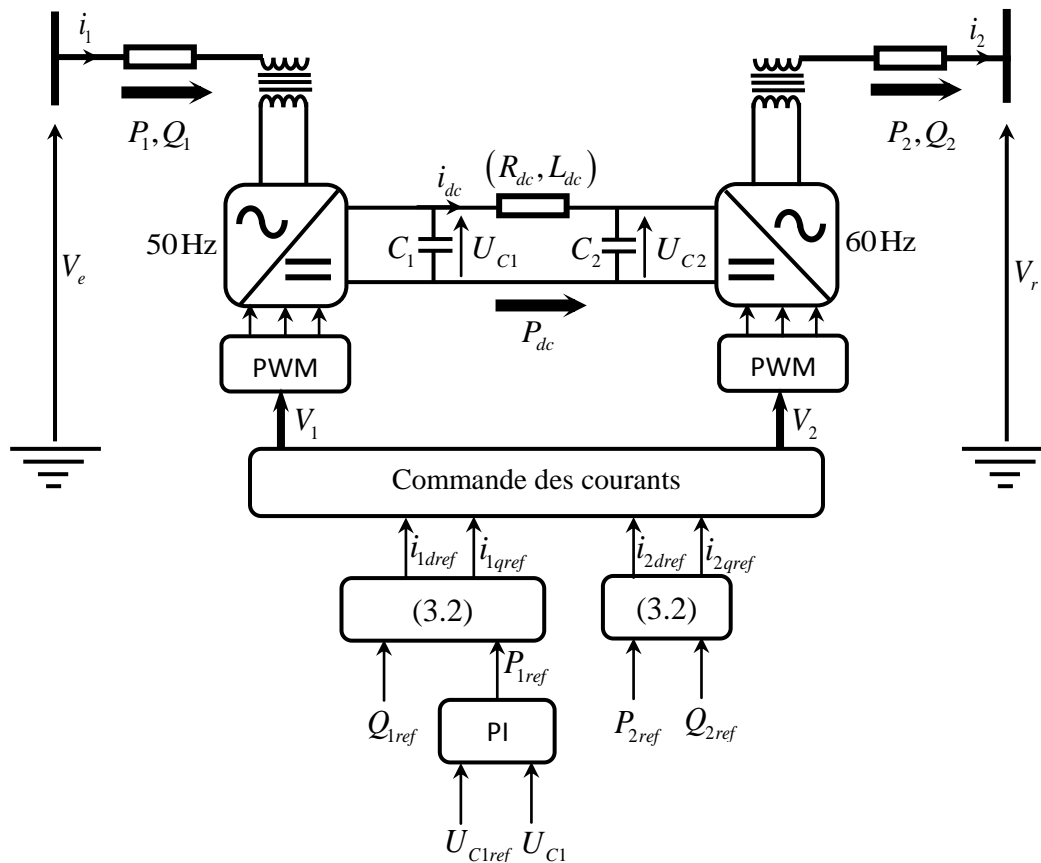


Figure.3.4. Structure globale de commande du système HVDC.

Pour commander le système HVDC, il y a lieu de respecter la théorie de la commande en cascade car, il y a deux sous systèmes à dynamiques très différentes. Pour cela, le système de commande de la tension continu permet d'alimenter le système de commande des courants, image directe des puissances.

Il y a lieu de noter que les puissances actives et réactives sont liées aux composantes synchrones de courant et de la tension par les relations (voir annexe B) :

$$\begin{cases} P_{ref} = V_d i_{dref} + V_q i_{qref} \\ Q_{ref} = V_q i_{dref} - V_d i_{qref} \end{cases} \quad (3.1)$$

Inversement,

$$\begin{cases} i_{dref} = (P_{ref} V_d + Q_{ref} V_q) / (V_d^2 + V_q^2) \\ i_{qref} = (P_{ref} V_q - Q_{ref} V_d) / (V_d^2 + V_q^2) \end{cases} \quad (3.2)$$

3.4. Commande de la tension du bus continue :

Etant donné que le modèle de la tension continue (2.32) est linéaire et à dynamique relativement lente, un régulateur conventionnel de type PI permettrait de réguler la tension aux bornes du premier condensateur U_{C1} à sa valeur nominale $U_{C1ref} = 40\text{kV}$.

Il est à noter que la régulation de la tension U_{C1} permet de réguler la tension aux bornes de l'autre condensateur U_{C2} à condition que le courant continu soit suffisamment lisse et les consignes des puissances soient constantes.

La figure 3.5 représente le schéma bloc de régulation de la tension continue.

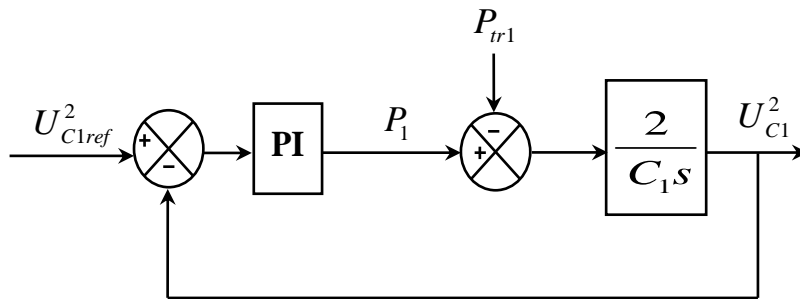


Figure.3.5. Schéma bloc de régulation de la tension continue

La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par :

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.3)$$

Où : k_p et k_i sont le gain proportionnel et le gain intégral, respectivement.

3.4.1. Synthèse du régulateur :

Il est clair que la fonction de transfert en boucle ouverte est $F_o(s) = \frac{2}{C_1 s} \frac{k_p s + k_i}{s}$ en boucle fermée, celle-ci est donnée par :

$$F_f(s) = \frac{2k_p s + 2k_i}{s^2 + \frac{2k_p}{C_1} s + \frac{2k_i}{C_1}} \quad (3.4)$$

Le polynôme caractéristique en boucle fermée est tel que :

$$\Delta(s) = s^2 + \frac{2k_p}{C_1} s + \frac{2k_i}{C_1} \quad (3.5)$$

Les gains de réglage sont déduits en faisant l'identification du polynôme caractéristique avec le polynôme optimale d'un second ordre, en l'occurrence :

$$\bar{\Delta}(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 \quad (3.6)$$

où : ξ et ω_n sont, respectivement, l'amortissement et la pulsation naturelle. Ils sont donnés

par : $\omega_n = \frac{3}{t_r}$ avec $t_r = 2s$ et $\xi = 0.7$.

Cela donne :

$$k_p = C_1 \xi \omega_n \approx 2.0 \times 10^{-4} \text{ et } k_i = \frac{C_1 \omega_n^2}{2} \approx 2.3 \times 10^{-4}.$$

3.5. Commande des courants :

Deux méthodes seront appliquées à la commande des courants dans le sous système alternatif à savoir : la commande par retour d'état et la commande à structure variable (par modes glissants)[4]-[5].

3.5.1. Commande par retour d'état :

La commande par retour d'état ou placement de pôles est un moyen de modifier le comportement en boucle fermée d'un système dynamique donné par une représentation d'état.

Cette technique est très adaptée aux systèmes linéaires. Un gain matriciel permet de placer les nouveaux pôles à des valeurs désirées qui imposent des performances désirées en boucle fermée.

Le système est modélisé dans le repère de Park par l'équation (2.27) vue au chapitre 2.

L'erreur de réglage est définie comme suit :

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_{ref} - \mathbf{X} \quad (3.7)$$

et sa dérivée $\dot{\mathbf{e}}$ est donnée par :

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\mathbf{U} - \mathbf{W} \quad (3.8)$$

On définit une nouvelle entrée de commande $\boldsymbol{\mu}$ par :

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{U} + \mathbf{K}\mathbf{e} \quad (3.9)$$

Où \mathbf{K} est un gain matriciel.

La dynamique de l'erreur de réglage est telle que :

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\boldsymbol{\mu} + \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{e} - \mathbf{W} \quad (3.10)$$

En utilisant le fait que $\mathbf{X} = \mathbf{X}_{ref} - \mathbf{e}$, (3.10) se réécrit comme suit :

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{e} + \dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X}_{ref} - \mathbf{W} - \mathbf{B}\boldsymbol{\mu} \quad (3.11)$$

La nouvelle commande $\boldsymbol{\mu}$ est choisie de façon à annuler le terme d'excitation

$$\dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X}_{ref} - \mathbf{W} - \mathbf{B}\boldsymbol{\mu} \quad (3.12)$$

Ce qui donne :

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{B}^{-1}(\dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X}_{ref} - \mathbf{W}) \quad (3.13)$$

et conduit à :

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{e} \quad (3.14)$$

dont, la solution s'exprime par :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}(0) \cdot e^{(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})t} \quad (3.15)$$

Pour garantir une erreur asymptotiquement stable, il faudrait choisir le gain \mathbf{K} de telle manière que toutes les valeurs propres de la matrice $\mathbf{A}+\mathbf{BK}$ aient leurs parties réelles négatives. Dans ce cas,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = \mathbf{0} \tag{3.16}$$

Les équations (3.9) et (3.13) renvoient à l'expression finale de la commande donnée par :

$$\mathbf{U} = \mathbf{B}^{-1}(\dot{\mathbf{X}}_{ref} - \mathbf{A}\mathbf{X}_{ref} - \mathbf{W}) - \mathbf{K}\mathbf{e} \tag{3.17}$$

La structure de réglage est donnée à la figure 3.6.

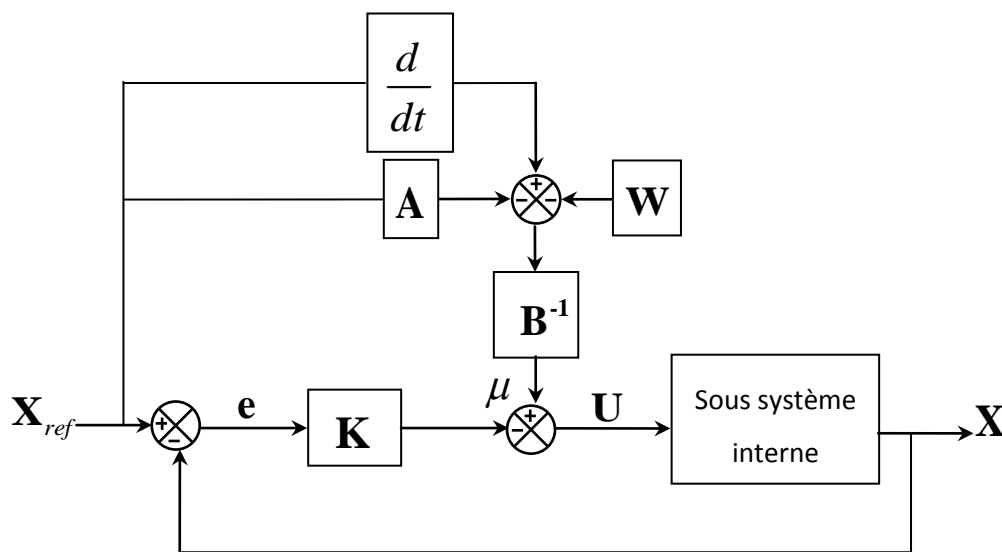


Figure.3.6. Structure de commande par retour d'état.

Dans l'environnement de calcul MATLAB, la fonction qui permet de calculer la matrice de retour d'état est :

```
>>K = -place(A,B,p)
```

Où \bar{p} : représente le vecteur des pôles désirés en boucle fermée. Ceux-ci sont imposés comme suit :

- (i) Deux pôles dominants sont calculés en fonction de la réponse oscillatoire amortie désirée. Cela se fait en choisissant l'amortissement ζ et la pulsation naturelle ω_n . En fonction de ces deux paramètres, la paire des pôles dominants est donnée par :

$$p_{1,2} = \omega_n(-\xi \pm j\sqrt{1-\xi^2}) \quad (3.18)$$

avec : $\omega_n = \frac{3}{t_r}$ et t_r est le temps de réponse pour $\xi = 0.7$.

- (ii) Les pôles restants doivent être suffisamment éloignés afin de ne pas influencer significativement la dynamique de la boucle fermée.

Pour un temps de réponse $t_r = 10\text{ms}$ et un facteur d'amortissement $\xi = 0.7$. Cela donne :

$$p_{1,2} = -210 \pm 214j \quad (3.19)$$

3.5.1.1. Résultat de simulation:

Afin d'analyser le fonctionnement du HVDC piloté par la loi de commande synthétisée plus haut, différents tests sont considérés à savoir :

Test 1 : situation normale sans perturbation extérieure ni incertitudes paramétriques.

Test 2 : situation de défaillance où 10% d'incertitude paramétrique est considérée.

Test 3 : situation de défaillance où 20% de chute de tension est survenue à l'instant $t = 2\text{ s}$ du côté émetteur pendant 60 ms.

Test 4 : situation de défaillance jumelant les tests 2 et 3.

Un programme Matlab a été élaboré pour simuler le fonctionnement du HVDC. Celui-ci implémente la méthode de Butcher-Boule pour la résolution des équations différentielles ordinaires sur un horizon de simulation de 4 s.

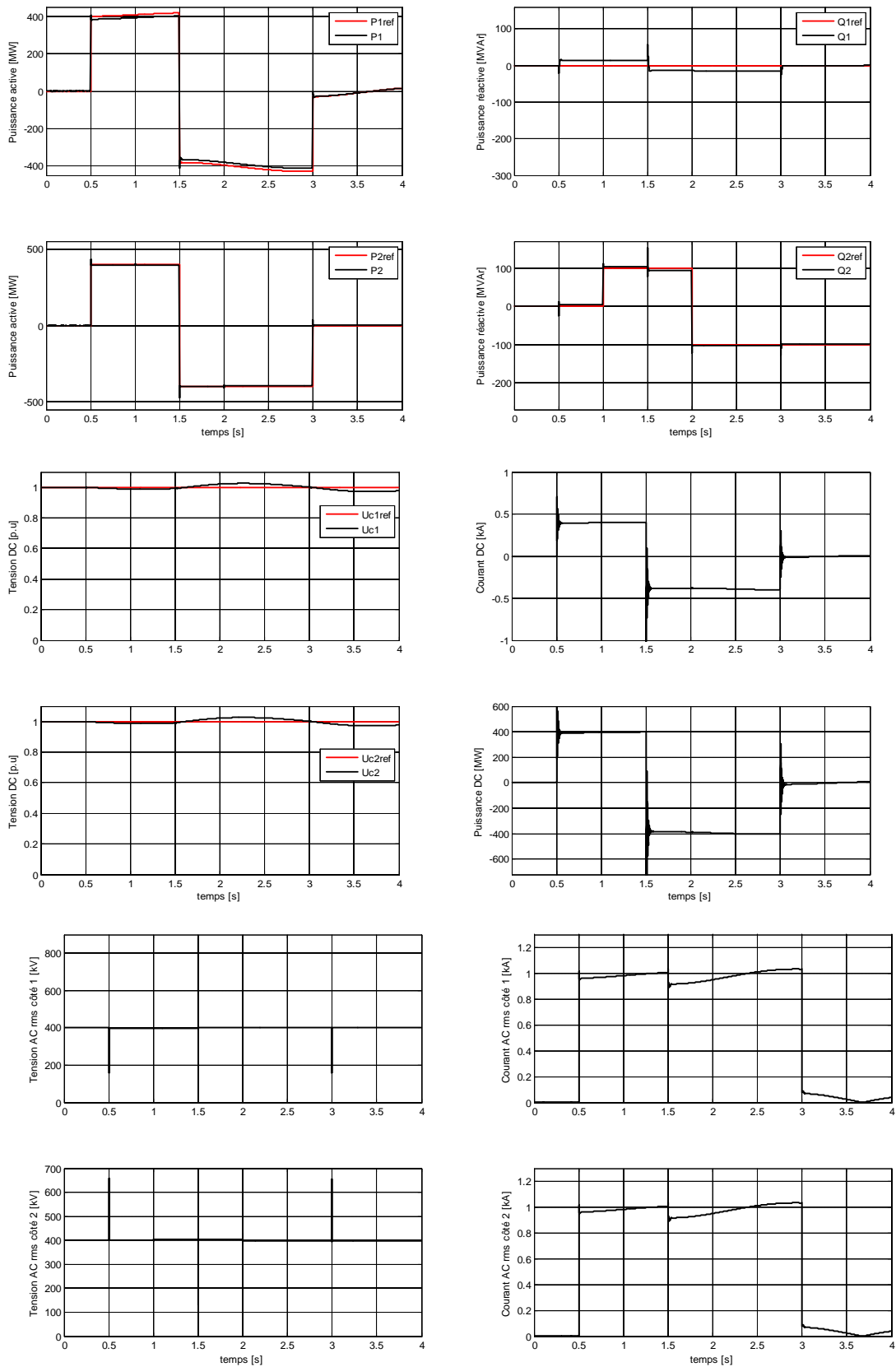


Figure.3.7. Réponse du HVDC pour le test 1.

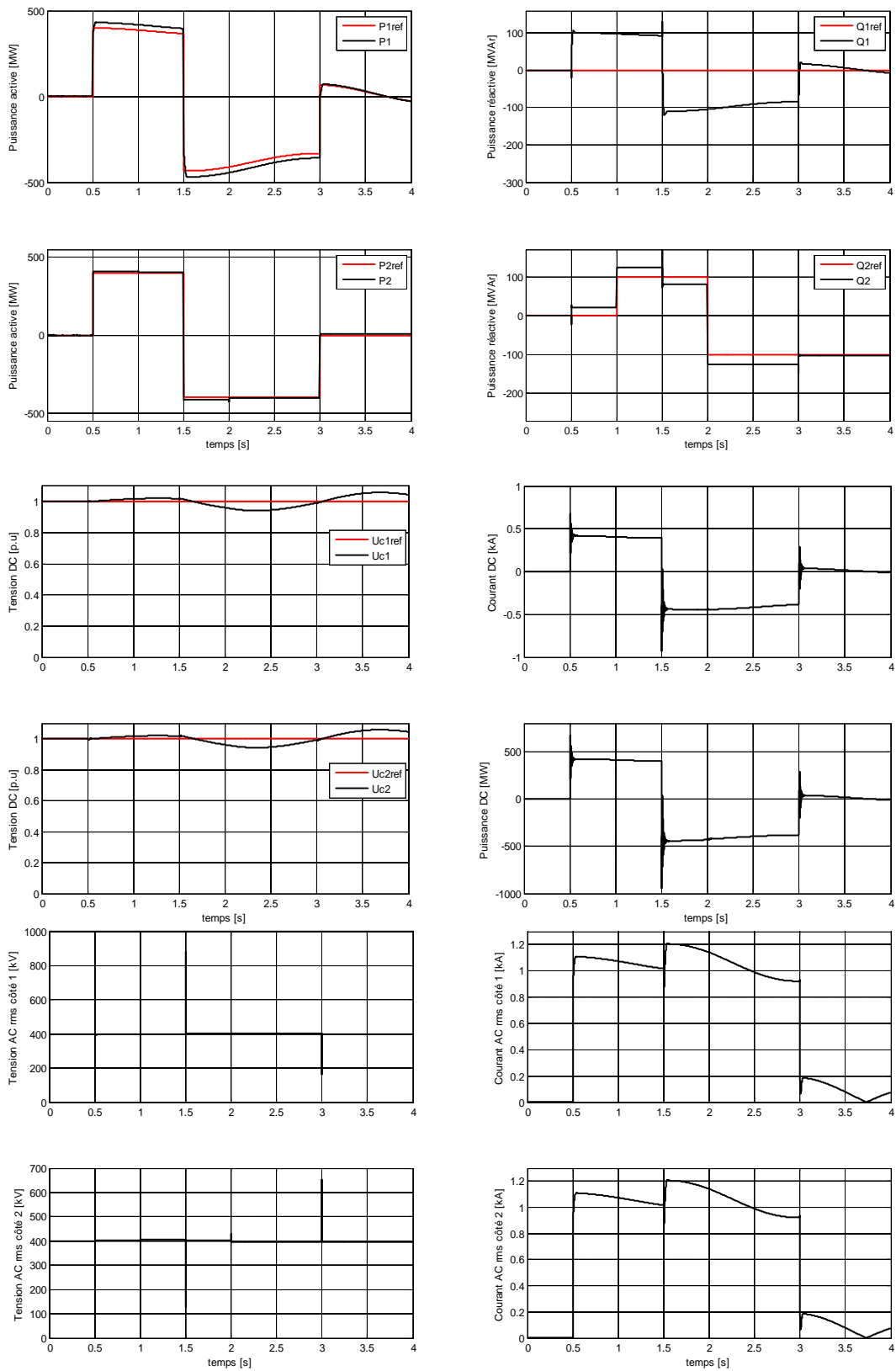


Figure.3.8. Réponse du HVDC pour le test 2.

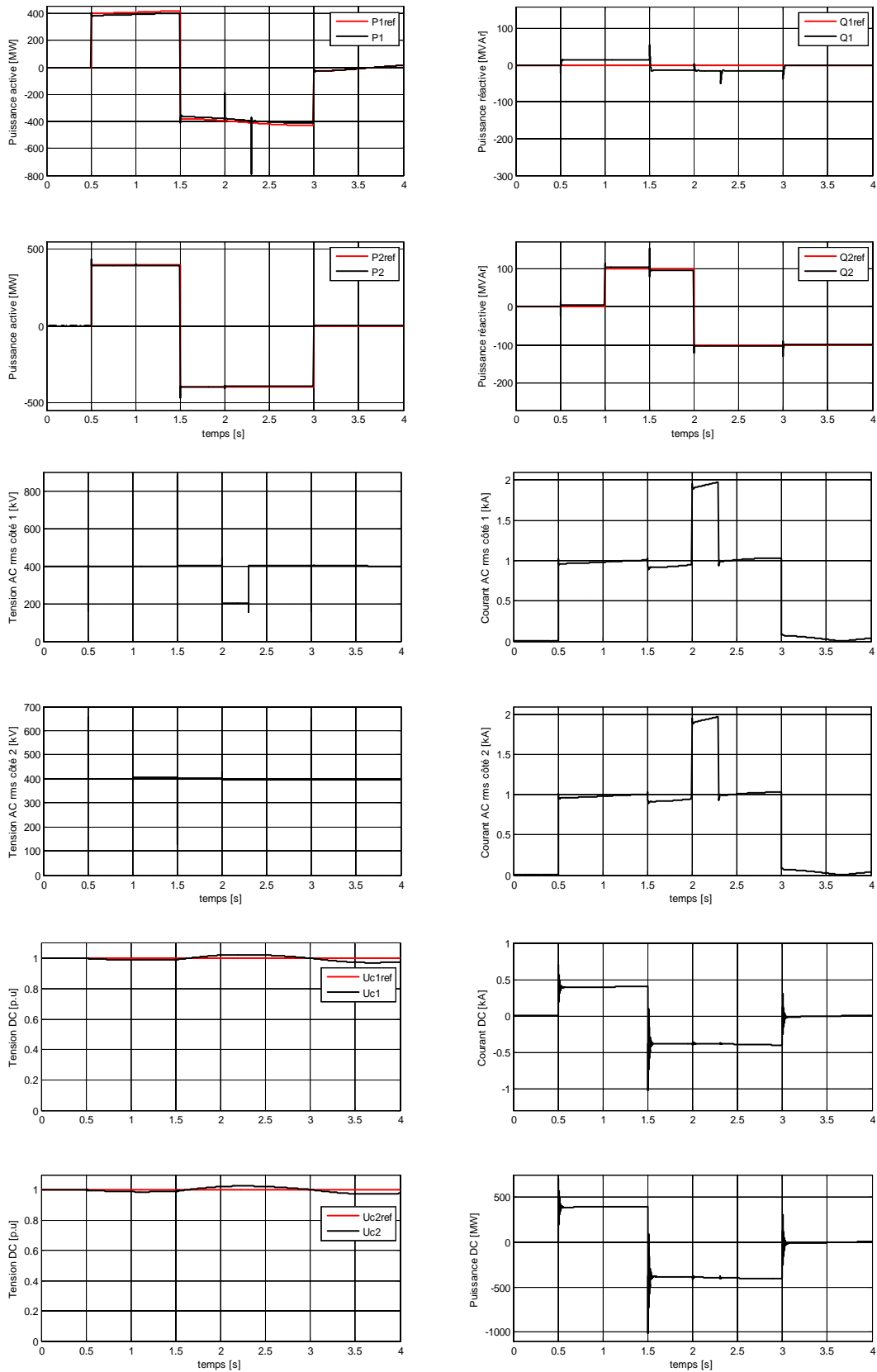


Figure.3.9. Réponse du HVDC pour le test 3.

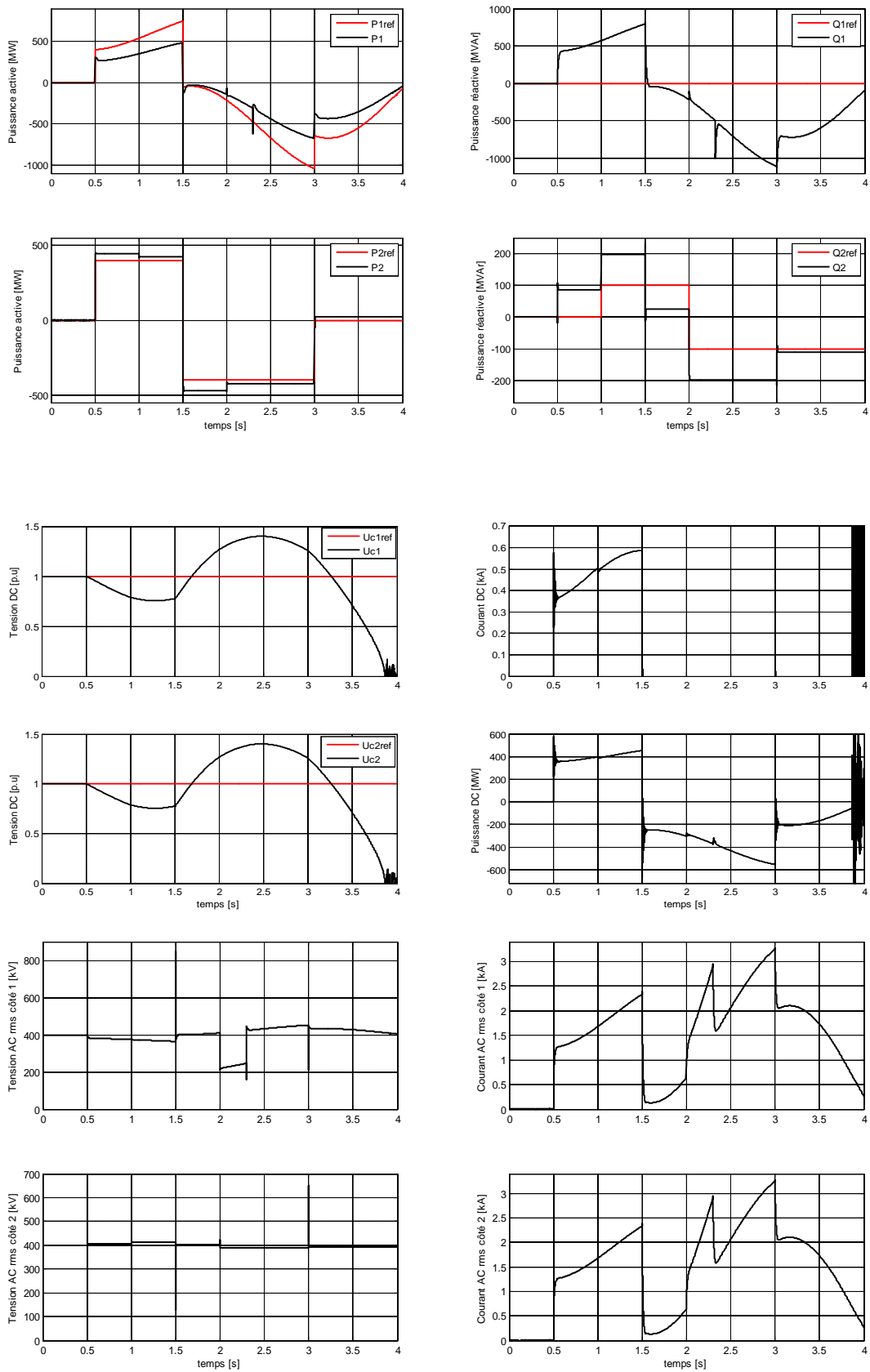


Figure.3.10. Réponse du HVDC pour le test 4.

D'après les figures 3.7 – 3.10, la commande par retour d'état a permis, en situation normale, de réguler les puissances actives et réactives ainsi que les tensions continues avec des signaux de commande admissibles. Cependant, en situation de défaillance, la commande a perdu sa performance de régulation et s'avère peu robuste aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes concrétisées par des chutes de tension.

Il y a lieu de noter aussi que la puissance réactive est très sensible aux variations paramétriques et aux changements de consignes de la puissance active. C'est le phénomène d'interaction dynamique entre puissances.

3.5.2. Commande par modes glissants :

Les premiers travaux sur ce type de commande ont été menés dans l'ancienne Union Soviétique à partir des années soixante initiée par le mathématicien soviétique A.G. FILIPPOV.

Le véritable essor de l'utilisation de cette technique date de la parution des livres de Itkis et de V. Utkin. Cette technique de commande a connu un progrès considérable en raison de sa simplicité et son application dans les divers domaines de l'automatique et de l'électronique de puissance. D'une autre part elle est due principalement à la propriété de convergence rapide et en temps fini des erreurs, ainsi que la grande robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures.

3.5.2.1. Synthèse de la commande par modes glissants :

La synthèse de la commande par modes glissants se fait en trois étapes :

- a- Choisir la surface de glissement :** La surface de glissement est choisie de façon à assurer la convergence d'une variable vers sa valeur désirée. Elle dépend de la dynamique désirée de l'erreur ainsi que du degré relatif de la sortie.
- b- Etablir la condition de convergence :** les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation.

- c- **Déterminer la loi de commande** : la commande permet d'atteindre la surface s et d'y rester. On peut utiliser le formalisme des fonctions de Lyapunov. C'est une fonction scalaire positive $V(s) > 0$ des variables d'état du système. Elle est utilisée pour estimer les performances de la commande et l'étude de la robustesse. Elle permet d'étudier la stabilité du système et l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.

Dans le cas scalaire, la fonction de Lyapunov par est définie par :

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (3.20)$$

Et sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (3.21)$$

La loi de la commande doit faire décroître cette fonction ($\dot{V}(s) < 0$) et l'idée est de choisir une commande fonction de $s(t)$ qui réaliserait la condition suivante :

$$\dot{s}(t) = -k \operatorname{sign}(s) \quad (3.22)$$

où k est un gain positif de conception.

La fonction $x \mapsto \operatorname{sign}(x)$ est définie par :

$$\operatorname{sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{si } s > 0 \\ 0 & \text{si } s = 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

Dans le cas de la commande des courants du système HVDC, les paramètres de l'équation d'état (2.27) sont incertains. En effet, la modélisation était basée sur un équivalent de Thévenin du système agrégé où les résistances, inductances et tensions sont en constante fluctuation en raison des conduites et changement de topologies qui s'opèrent dans les deux réseaux.

On suppose que seules les valeurs nominales : \mathbf{A}_n , \mathbf{B}_n et \mathbf{W}_n soient connues et que les incertitudes correspondantes : $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$ et $\Delta\mathbf{W}$ soient inconnues mais bornées [2]-[3].

Le système (2.27) peut se réécrire comme suit :

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_n \mathbf{X} + \mathbf{B}_n \mathbf{U} + \mathbf{W}_n + \mathbf{D} \quad (3.24)$$

Où $\mathbf{D} = \Delta\mathbf{A}\mathbf{X} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{U} + \Delta\mathbf{W} + \mathbf{d}$ est le vecteur d'incertitude globale et \mathbf{d} un terme représentant les non-linéarités et les dynamiques négligées.

La bornitude du vecteur \mathbf{D} peut s'écrire :

$$|D_i| \leq \bar{D}_i \quad (3.25)$$

avec \bar{D}_i $i = 1, \dots, 4$ sont des constantes positives.

La surface de glissement est choisie comme suit :

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{e}(t) + \lambda \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau \quad (3.26)$$

Sa dérivé est donnée par :

$$\dot{\mathbf{S}}(t) = (\dot{\mathbf{e}} + \lambda \mathbf{e}) \quad (3.27)$$

Où λ est une matrice diagonale avec des éléments positifs.

Pour stabiliser l'erreur de réglage en courant, on propose la loi de commande suivante :

$$\mathbf{U} = \mathbf{B}_n^{-1} (\dot{\mathbf{X}}^{ref} - \mathbf{A}_n \mathbf{X} - \mathbf{W}_n + \lambda \mathbf{e} + \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{S})) \quad (3.28)$$

Où \mathbf{K} est une matrice constante diagonale vérifiant la condition ci-dessous :

$$K_{ii} > \bar{D}_i, \text{ pour } i = 1 \dots 4 \quad (3.29)$$

Théorème : le régime de glissement de la surface de réglage du système (3.26) commandé par la loi de commande (3.28) sous la condition (3.29) existe et est atteint en temps fini défini par (3.48).

Démonstration : Soit V la fonction de Lyapunov définie positive donnée par l'expression :

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 S_i^2 = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \quad (3.30)$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} \quad (3.31)$$

En remplaçant $\dot{\mathbf{S}}$ par son expression (3.27) dans (3.31), il résulte :

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T (\dot{\mathbf{e}} + \lambda \mathbf{e}) \quad (3.32)$$

En utilisant les équations (3.24) et (3.28), l'expression (3.32) conduit à :

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T (-\mathbf{K}\text{sign}(\mathbf{S}) - \mathbf{D}) \quad (3.33)$$

L'expression (3.33) peut se réécrire de façon explicite comme suit :

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^4 S_i (-K_i \text{sign}(S_i) - D_i) \quad (3.34)$$

La fonction \dot{V} est majorée comme suit :

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^4 (K_{ii} - \bar{D}_i) |S_i| \quad (3.35)$$

La condition (3.29) signifie qu'il existe quatre constante positives σ_i , pour $i=1, \dots, 4$ telles que :

$$\sigma_i = K_{ii} - \bar{D}_i \quad (3.36)$$

Cela signifie que \dot{V} est majoré par :

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^4 \sigma_i |S_i| \quad (3.37)$$

Cette dernière inégalité montre que \dot{V} est définie négative. Par conséquent, la surface de glissement \mathbf{S} est asymptotiquement stable. Autrement dit :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (3.38)$$

En utilisant (3.27), (3.38) conduit à :

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\lambda \mathbf{e}(t) \quad (3.39)$$

donc la solution est donnée par

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}(0) e^{-\lambda t} \quad (3.40)$$

par conséquent,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = \mathbf{0} \quad (3.41)$$

et l'erreur de réglage converge vers zéro.

Par ailleurs, si on pose $\rho = \min \{ \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4 \}$ alors, (3.37) conduit à :

$$\dot{V} \leq -4\rho \sum_{i=1}^4 |S_i| \quad (3.42)$$

En utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwarz suivante :

$$\sum_{i=1}^4 |S_i| \geq \sqrt{\sum_{i=1}^4 S_i^2} \quad (3.43)$$

Il en résulte :

$$\dot{V} \leq -4\rho \sum_{i=1}^4 |S_i| \leq -4\rho \sqrt{\sum_{i=1}^4 S_i^2} \quad (3.44)$$

En utilisant (3.30), (3.44) permet d'écrire :

$$\dot{V} \leq -4\sqrt{2}\rho\sqrt{V} \quad (3.45)$$

L'intégration de l'inégalité (3.45) dans l'intervalle du temps [0 ; t] donne :

$$\int_{V(0)}^{V(t)} \frac{dV}{2\sqrt{V}} \leq \int_0^t -2\sqrt{2}\rho dt \quad (3.46)$$

d'où :

$$t \leq \frac{\sqrt{V(0)} - \sqrt{V(t)}}{2\sqrt{2}\rho} \leq \frac{\sqrt{V(0)}}{2\sqrt{2}\rho} \quad (3.47)$$

Cela implique que la convergence de l'erreur de réglage en courant se fait en temps fini qui ne saurait dépasser t_{\max} tel que :

$$t_{\max} = \frac{\sqrt{V(0)}}{2\sqrt{2}\rho} \quad (3.48)$$

D'après (3.48), le temps de convergence t_{\max} est inversement proportionnel à la valeur de ρ . Par conséquent, des valeurs élevées de ρ correspondent à des temps de convergence très courts. Cependant, d'après (3.28) et (3.36), il est évident que le signal de commande U serait à énergie très élevée et il reste au concepteur de trouver le meilleur compromis.

Pour réduire le phénomène de broutement, la fonction signe est remplacée par une fonction sigmoïde définie par :

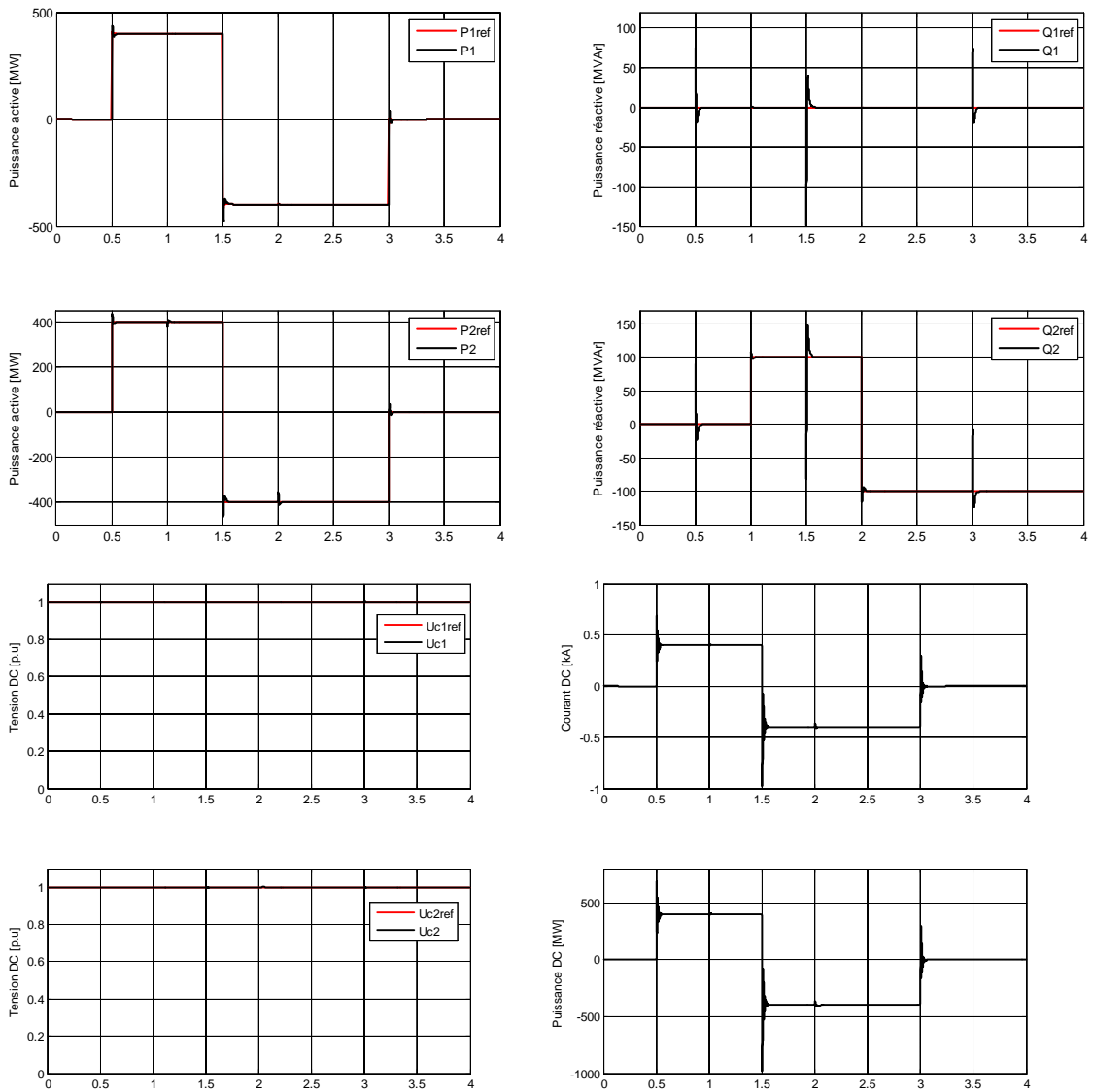
$$x \mapsto \frac{2}{1 + e^{-0.2x}} - 1 \tag{3.49}$$

3.5.2.2. Résultats de simulation

De même que pour la commande par retour d'état, le fonctionnement de du HVDC piloté par la commande par modes glissants est testé dans les mêmes scenarii.

Les gains qui ont donné satisfaction sont choisis tels que :

$$\lambda = \text{diag}([8 \ 8 \ 12 \ 12]) \text{ et } \mathbf{K} = \text{diag}([150 \ 150 \ 120 \ 120]).$$



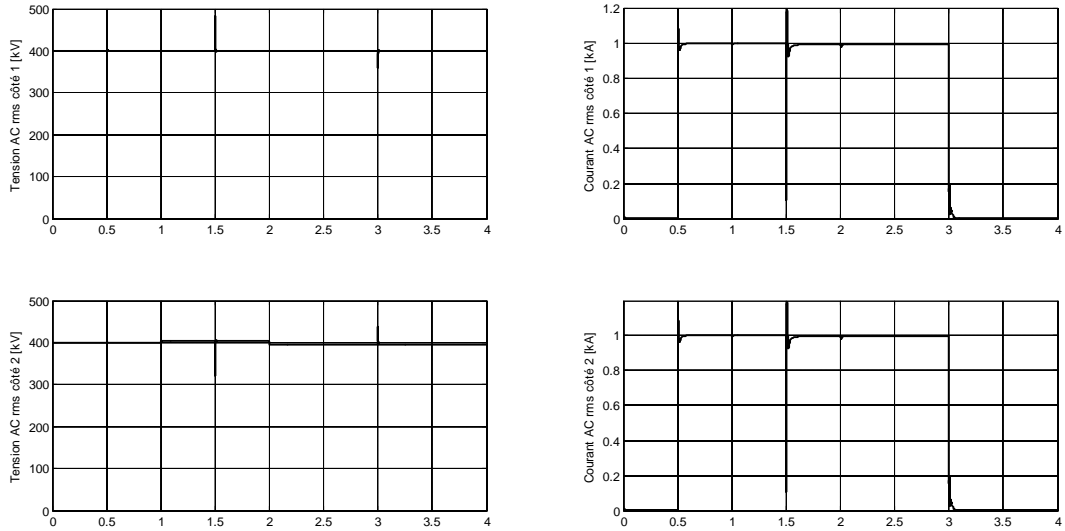
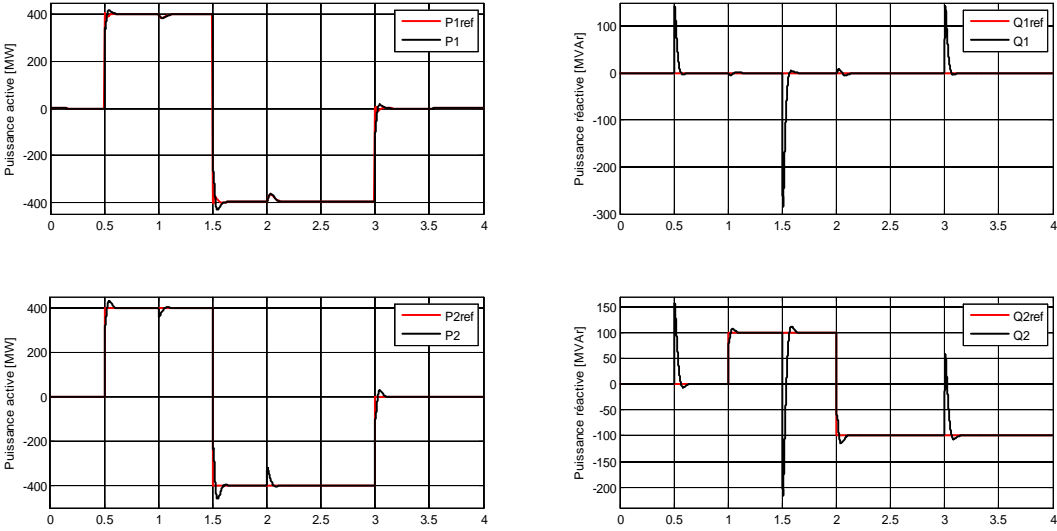


Figure.3.11. Réponse du HVDC pour le test 1.



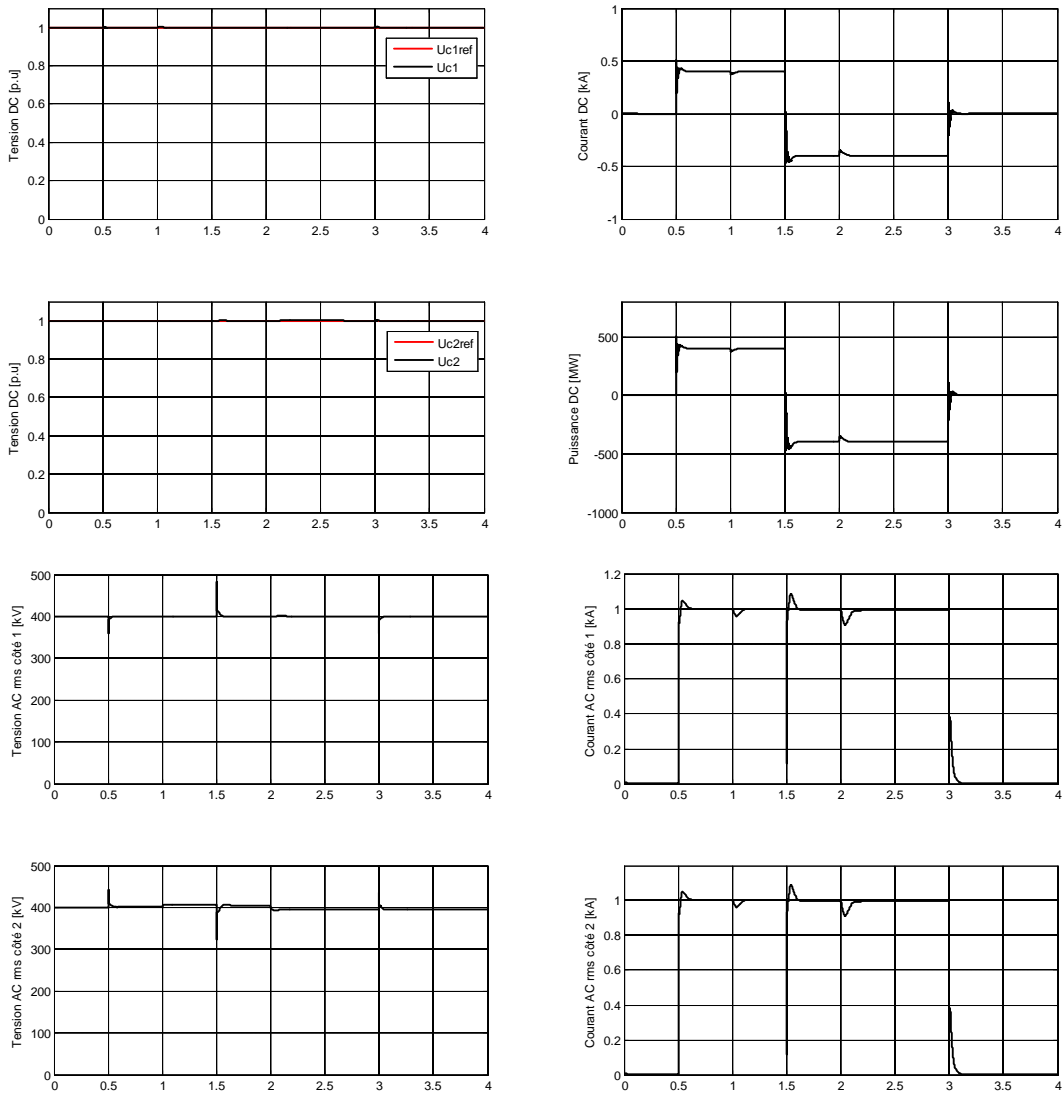
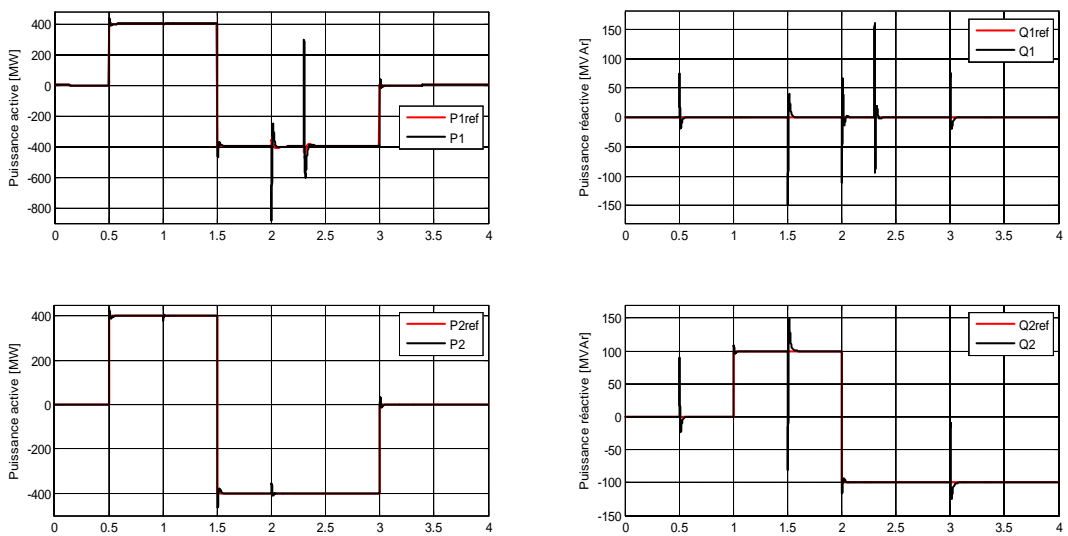


Figure.3.12. Réponse du HVDC pour le test 2.



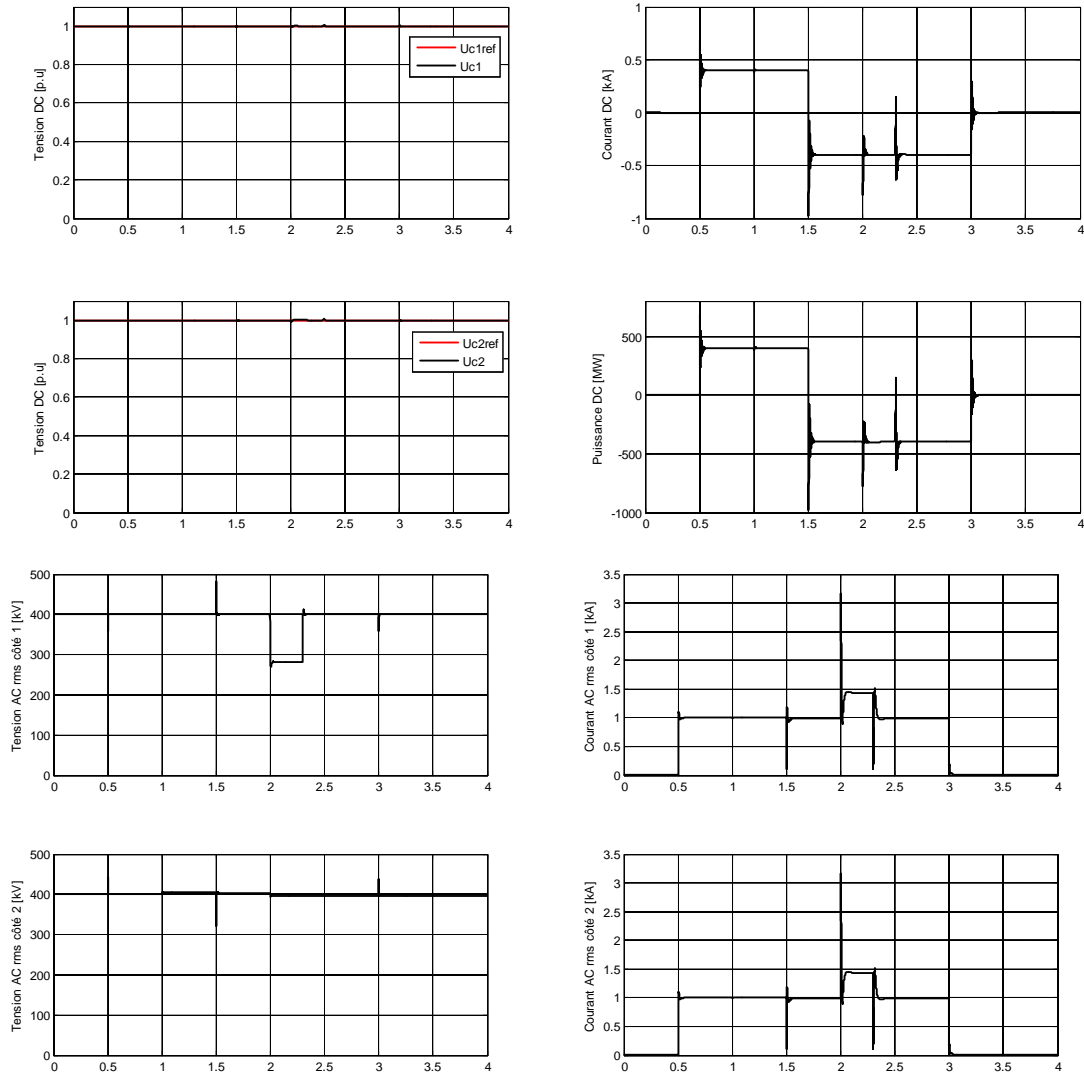
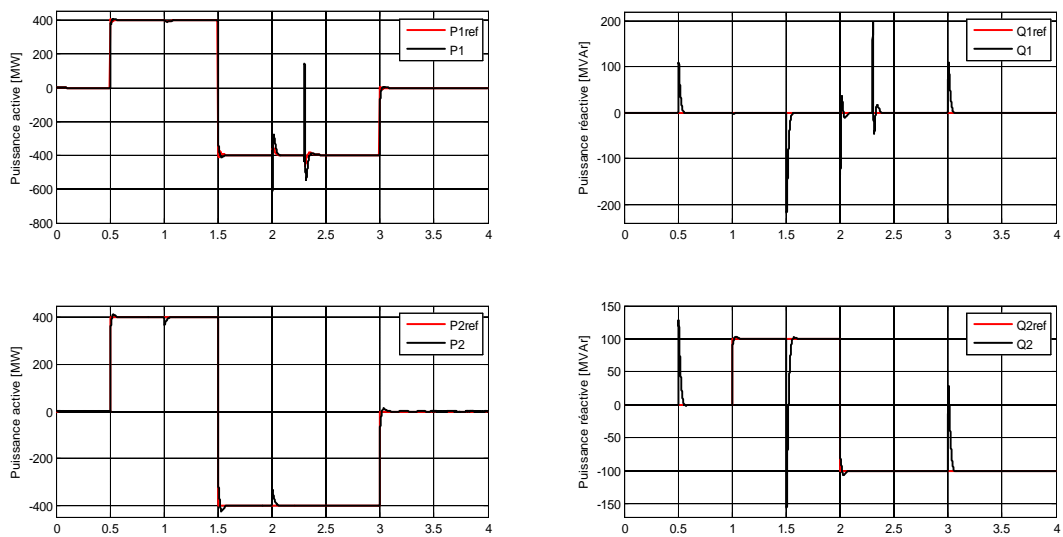


Figure.3.13. Réponse du HVDC pour le test 3.



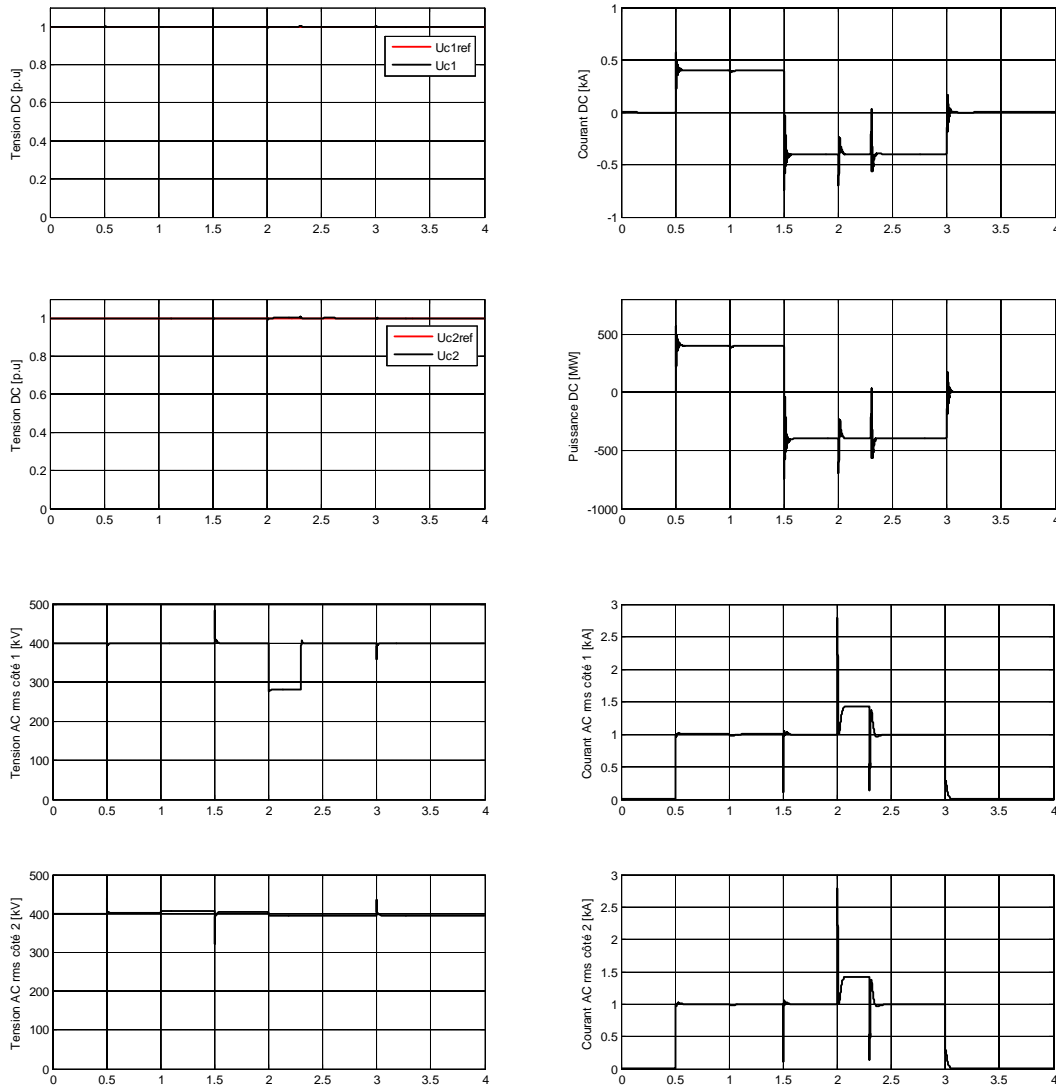


Figure.3.14. Réponse du HVDC pour le test 4.

D'après les figures 3.11 – 3.14, la commande par modes glissants a permis, en situations normale et de défaillance, de réguler les puissances actives et réactives ainsi que les tensions continues. Cependant, en situation de défaillance, les tensions de commande sont relativement élevées. Cette loi de commande s'avère très robuste aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes.

Il y a lieu de noter aussi que la commande par modes glissants a rendu la puissance réactive moins sensible aux variations paramétriques et aux changements de consignes de la puissance active, en comparaison à la commande par retour d'état.

3.5.3. Analyse et discussion :

A la lumière des résultats de simulation du fonctionnement du HVDC piloté par les deux techniques de commande : le retour d'état et les modes glissants, il est clair que la commande par les modes glissants est meilleure en termes de : robustesse aux variations paramétriques, qui affectent inévitablement le modèle du système, et atténuation de l'effet des chutes de tension, qui surviennent souvent aux jeux de barres à tension non contrôlée tels que les postes de transport d'électricité.

3.6. Conclusion :

Le présent chapitre expose les synthèses du régulateur de la tension continue ainsi que celui des courants alternatifs. Ce dernier utilise soit une loi de commande par retour d'état soit une loi de commande par modes glissants.

Les résultats de simulation en situation normale et en situation de défaillance montrent que la commande par modes glissants est meilleure. En effet, celle-ci est remarquablement robuste aux variations paramétriques et perturbations externes.

Conclusion générale

La consommation de l'énergie électrique à l'heure actuelle ne cesse de croître et les contraintes technico-économiques et environnementales ne cessent de s'imposer. Cela fait de l'amélioration du fonctionnement des réseaux électriques une première nécessité pour les opérateurs de réseaux. En effet, ces réseaux électriques souffrent de la complexité de structure qui rend leur gestion conventionnelle difficile. Les solutions classiques utilisées par les exploitants partout à travers le monde, sont devenues insuffisantes vu la lenteur de réponse des appareils, l'extension des délais de construction, les coûts élevés d'exploitation et l'encombrement foncier.

Comme solution moderne, le HVDC est un dispositif à base d'électronique de puissance destiné à la commande des réseaux. Il se substitue d'une façon très efficace aux solutions techniques conventionnelles et améliore d'une façon significative la conduite d'une interconnexion électrique. En effet, ce dispositif performant assure une réponse quasi-instantanée et il permet aussi d'exploiter les ouvrages près de leurs limites thermiques ou d'augmenter leurs capacités de transport voire même de stabilité. De plus, il est économiquement très rentable et règle beaucoup de problèmes techniques.

Dans ce projet de fin d'étude, nous nous sommes intéressés à l'étude du fonctionnement et de la commande d'une interconnexion électrique dotée d'un HVDC liant deux réseaux asynchrones. Pour ce faire, nous avons commencé par donner quelques généralités concernant les réseaux électriques (mission, constitution et fonctionnement) puis exposé quelques niveaux de conduite conventionnelle adoptée par la plus part des compagnies d'électricité pour assurer la gestion des réseaux à charge.

Afin d'établir un modèle du système dans l'espace d'état, les lois de Kirchhoff en courant alternatif triphasé ont été utilisées. Le modèle obtenu a été projeté dans le repère synchrone pour avoir un modèle continu et plus simple. Ce modèle a été utilisé pour synthétiser deux lois de commande pour conduire le HVDC dans la régulation des puissances actives et réactives ainsi que la tension du bus continu à leurs consignes. Ces techniques concernent une commande par retour d'état puis une commande par modes glissants. Le fonctionnement du HVDC a été testé pour quatre tests différents où des incertitudes paramétriques et des chutes de tension ont été considérées.

Les résultats de simulation du système piloté par les deux lois de commandes, ont montré qu'en situation normale, les réponses étaient performantes. En situation de défaillance, la commande par retour d'état a donné des réponses dégradées voire même instables.

Conclusion générale

En contre partie, la commande par modes glissants s'avère très robuste aux incertitudes paramétriques et très peu sensible aux chutes de tension.

Comme perspectives à ce travail, il serait intéressant de tester d'autres techniques de commande robustes comme la commande adaptative floue pour voir s'il est possible d'améliorer davantage le fonctionnement du HVDC, ou utiliser le HVDC pour connecter au réseau une ferme éolienne offshore.

Annexe A : Transformation de Park :

L'ensemble des tensions triphasées engendrent un vecteur tournant à la vitesse de synchronisme $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence fondamentale de la source. Ce vecteur tournant (champ tournant) s'exprime dans le plan complexe par son affixe donné par l'équation ci-dessous :

$$\bar{V}_{abc} = \bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c \tag{A.1}$$

Ce champ tournant a pour module $V = \sqrt{\frac{3}{2}}V_{\max}$ et pour argument ou phase $\theta = \omega t$ où :

V_{\max} est la tension crête simple de la source.

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ est le nombre complexe racine troisième de l'unité.

La transformation de Park se fait en deux étapes :

A.1 Transformation (α - β) de Concordia : elle consiste à projeter les grandeurs alternatives triphasées dans le repère diphasé fixe (a , b) dans lequel les grandeurs biphasées restent sinusoïdales (figure A.1)

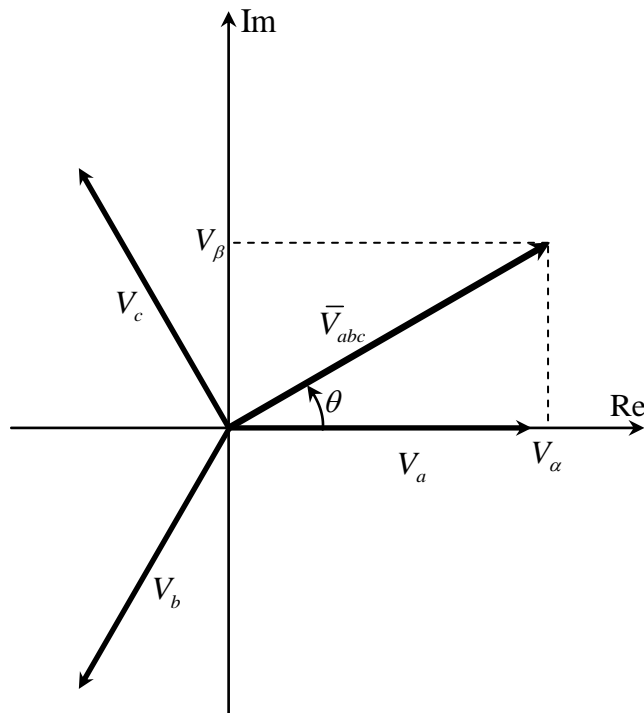


Figure.A.1. Champ tournant et transformation (α , β).

L'expression analytique de la transformation intermédiaire (Concordia) est donnée par:

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Où la matrice $T_{\alpha\beta}$ est telle que :

$$T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

avec :

V_α : Première composante diphasée,

V_β : Seconde composante diphasée,

V_0 : Composante homopolaire,

$[V_a \ V_b \ V_c]^T$: Système de tension triphasée.

La matrice de transformation inverse de Concordia est donnée par :

$$T_{\alpha\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

A.2. Transformation d-q : une fois les composantes V_α et V_β déterminées, celles-ci restent sinusoïdales, ce qui n'est pas facile à exploiter en particulier, dans des applications de commande. La transformation d-q vient compléter la transformation de Concordia dans le but d'avoir des grandeurs continues, comme il est illustré à la figure A.2. Le repère fixe subit une rotation à la vitesse de synchronisme dans le sens direct ce qui entraîne, après projection sur les axes d-q du référentiel tournant, des composantes directe V_d et en quadrature V_q continues menant à leur tour à un modèle continu.

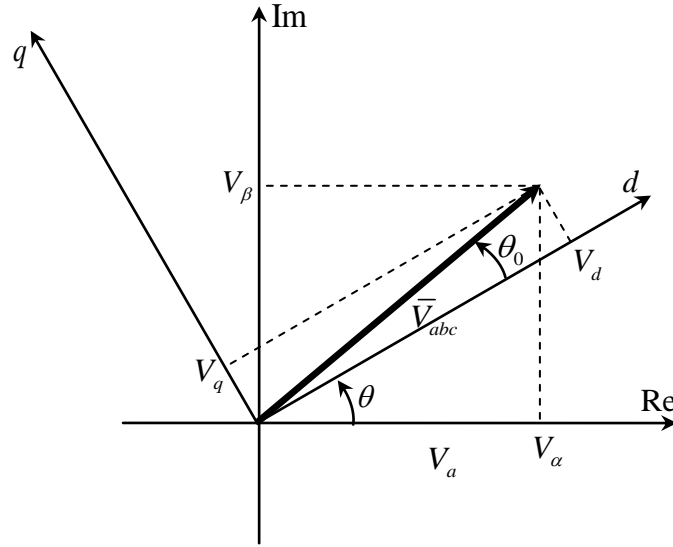


Figure.A.2. Transformation d-q.

La transformation d-q est donnée par l'expression (rotation d'un angle (θ) par rapport à l'axe normal au plan (α, β) dans le sens direct :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = T_{dq} \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix}$$

Où : la matrice T_{dq} est telle que :

$$T_{dq} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Où θ est l'angle de synchronisme formé par les vecteurs \vec{V}_α et \vec{V}_d , il est donné par :

$$\theta = \arctan 2(V_\beta, V_\alpha) \quad (\text{A.2})$$

La matrice de transformation d-q inverse est donnée par l'expression :

$$T_{dq}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Annexes

Il est à noter que toutes les transformations précédentes sont orthogonales. La matrice de transformation de Park est le produit des matrices de transformation T_{dq} et $T_{\alpha\beta}$, elle est donnée par :

$$P_{park} = T_{dq} \cdot T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

La matrice inverse est:

$$P_{park}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Sa dérivée en fonction du temps est :

$$\frac{dP_{park}^{-1}}{dt} = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{pmatrix} \frac{d\theta}{dt}$$

Il est claire que :

$$P_{Park} \frac{dP_{park}^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{pmatrix} \frac{d\theta}{dt}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \omega$$

Annexe B : Expressions des puissances dans le repère synchrone

Etant donné que les axes du repère fixe sont tout le temps orthogonaux, on peut considérer l'axe a comme axe des réels et l'axe b comme axe des imaginaires (figure B.1). Dans ce cas de figure, l'expression de la tension et celle du courant sont données par :

$$V = V_\alpha + jV_\beta \quad (\text{B.1})$$

$$i = i_\alpha + ji_\beta \quad (\text{B.2})$$

La puissance apparente est donnée par l'expression :

$$\begin{aligned} S &= V \cdot \bar{i} = (V_\alpha + jV_\beta) \cdot (i_\alpha + ji_\beta) \\ &= (V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta) + j(V_\beta i_\alpha - V_\alpha i_\beta) \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

On en déduit les expressions de la puissance active et réactive :

$$P = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta \quad (\text{B.4})$$

$$Q = V_\beta i_\alpha - V_\alpha i_\beta \quad (\text{B.5})$$

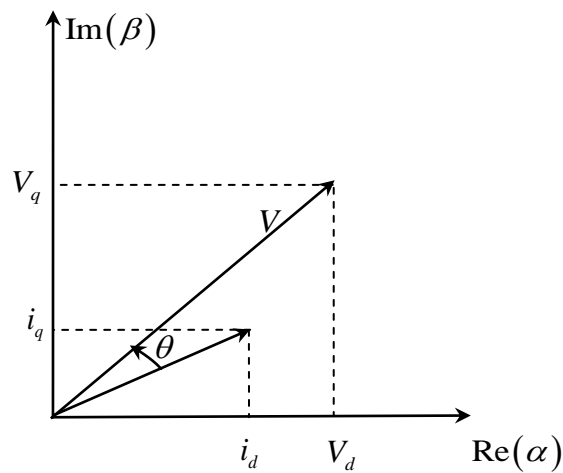


Figure.B.1. Représentation vectorielle de la tension et du courant dans le repère d-q

Pour exprimer les puissances actives et réactives dans le repère synchrone, on utilise la matrice de transformation inverse T_{dq}^{-1} et on exploite les expressions (B.3), (B.4), (B.5) :

$$P = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta = V_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} = (T_{dq}^{-1} V_{dq})^T T_{dq}^{-1} i_{dq} \quad (\text{B.6})$$

Sachant que la matrice T_{dq}^{-1} est unitaire donc égale à sa transposée, l'équation (B.6) devient :

$$P = V_{dq}^T T_{dq} T_{dq}^{-1} i_{dq} = V_{dq}^T i_{dq} \quad (\text{B.7})$$

Finalement, la puissance active est donnée par l'expression suivante :

$$P = V_d i_d + V_q i_q \quad (\text{B.8})$$

De même :

$$Q = V_\beta i_\alpha - V_\alpha i_\beta = V_{\alpha\beta}^T D i_{\alpha\beta} = (T_{dq}^{-1} V_{dq})^T T_{dq}^{-1} D i_{dq} \quad (\text{B.9})$$

Où : D est la matrice carrée définie par:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Le développement de l'équation (B.9) entraîne :

$$Q = V_{dq}^T T_{dq} T_{dq}^{-1} D i_{dq} = V_{dq}^T D i_{dq} \quad (\text{B.10})$$

La puissance active est donnée par l'expression suivante :

$$Q = V_q i_d - V_d i_q \quad (\text{B.11})$$

Annexe C : Algorithme de Butcher-Boole pour la résolution des équations différentielles ordinaires

La méthode de Butcher Boole appelée aussi Runge-Kutta d'ordre 6 est une méthode d'approximation itérative des solutions d'équations différentielles ordinaires. Son algorithme pour une équation différentielle $\dot{x} = f(x, u)$ et pour un pas h , est donné comme suit :

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_i, u) & K_4 &= f(x_i + \frac{K_3 - K_2}{2} h, u) \\ K_2 &= f(x_i + \frac{K_1}{4} h, u) & K_5 &= f(x_i + (\frac{3}{16} K_1 + \frac{9}{16} K_4) h, u) \\ K_3 &= f(x_i + \frac{K_1 + K_2}{8} h, u) & K_6 &= f(x_i + (\frac{-3}{7} K_1 + \frac{2}{7} K_2 + \frac{12}{7} K_3 - \frac{12}{7} K_4 + \frac{8}{7} K_5) h, u) \end{aligned}$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{h}{90} (7K_1 + 32K_3 + 2K_4 + 35K_5 + 7K_6)$$

Bibliographie

- [1] Gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE, "Mémento de la sûreté du système électrique", 2004, EDF France.
- [2] A. HAMACHE, M. O. BENSIDHOUM and H. CHEKIREB, "Sling Mode Control with Time Delay Disturbance Estimator For Power Flow Control Using SVC-HVDC", *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol.12 No.2, 2016.
- [3] A. HAMACHE, M. O. BENSIDHOUM and H. CHEKIREB, "Adaptive sliding mode with time delay control based on convolutions for power flow reference tracking using VSC-HVDC system", accepté pour publication dans *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016.
- [4] H. Ramadan, H. Siguerdidjane, M. Petit and R. Kaczmarek, "Performance enhancement And robustness assesment of VSC-HVDC transmission systems controllers under uncertainties", *International Journal of Electrical Power and Energy System* 2012, vol.35, pp.34-46.
- [5] H. Ramadan, H. Siguerdidjane and M. Petit, "A Robust Stabilizing Nonlinear Control Design for VSC-HVDC Systems: A Comparative Study", *IEEE 2009 International Conference on Industrial Technology*, Gippsland, Australia, 10-13 February 2009, pp. 1-6.