

PROfil

Le réseau électrique dans son intégralité

Pieter Schavemaker et Lou van der Sluis
Traduction de Emmanuel Hoang

Le réseau électrique dans son intégralité

Le réseau électrique dans son intégralité

Pieter Schavemaker et Lou van der Sluis

Traduit par Emmanuel Hoang

Authorized French translation from the English language edition, entitled “Electrical power system essentials”, 2nd edition, by P. Schavemaker and L. van der Sluis published by John Wiley & Sons © 2017. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with EDP Sciences and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2227-0 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2228-7

Tous droits de traduction, d’adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n’autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l’article 41, d’une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l’usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d’autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d’exemple et d’illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l’auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l’article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2019

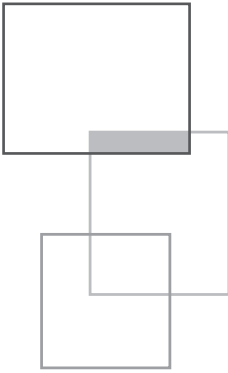


Table des matières

Préface	11
Chapitre 1 • Outils mathématiques pour l'analyse des réseaux électriques	17
1.1 Introduction	17
1.2 Un peu de physique	18
1.3 Caractéristiques générales des systèmes électriques	21
1.3.1 Alternatif ou continu	21
1.3.2 Réseau à 50 Hz et réseau à 60 Hz	25
1.3.3 Système triphasé équilibré	26
1.3.4 Niveaux de tension	34
1.4 Phaseur	38
1.4.1 Éléments d'un réseau électrique et phaseurs associés	39
1.4.2 Calculs dans le domaine des phaseurs	42
1.5 Équivalence entre couplage triangle et couplage étoile	47
1.6 Puissances dans le cas du monophasé	49
1.6.1 Puissance active et puissance réactive	49
1.6.2 Puissances complexes	53
1.6.3 Facteur de puissance	56
1.7 Puissances en triphasé	58
1.8 Normalisation unitaire	59
1.9 Structure du réseau de transport de l'électricité	63
Exercices	65
Références bibliographiques	67

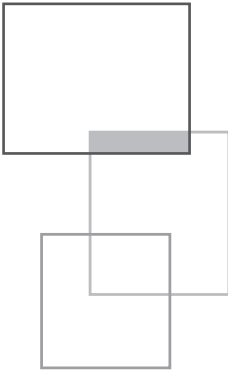
Chapitre 2 • Physique des centrales électriques	69
2.1 Introduction	69
2.2 Centrales thermiques	71
2.2.1 Principe physique (thermodynamique)	72
2.3 Centrales nucléaires	77
2.3.1 Fission nucléaire	78
2.3.2 Fusion nucléaire	82
2.4 Énergies renouvelables	83
2.4.1 Énergie du vent et technologie des aérogénérateurs	83
2.4.2 Hydroélectricité (production et stockage d'énergie)	87
2.4.3 Énergie solaire	90
2.4.4 Géothermie	93
2.5 Alternateurs (machine synchrone en fonctionnement générateur)	95
Exercices	104
Références bibliographiques	106
Chapitre 3 • Transport et distribution de l'énergie électrique	107
3.1 Introduction	107
3.2 Réseaux de transport et de distribution	109
3.3 Structures des réseaux	112
3.4 Sous-stations	115
3.5 Structure d'une sous-station	118
3.5.1 Système à jeu de barres unique	118
3.5.2 Système à double jeu de barres	118
3.5.3 Système à jeux de barres en polygone	119
3.5.4 Concept de un « disjoncteur et demi »	120
3.6 Protection des réseaux de transport et de distribution	121
3.6.1 Principes de fonctionnement des dispositifs de déclenchement	122
3.6.2 Fusibles	127
3.6.3 Disjoncteurs	129
3.6.4 Coupure de l'arc	130
3.6.5 Disjoncteur dans l'huile	132
3.6.6 Disjoncteurs à air comprimé	133
3.6.7 Disjoncteurs au SF ₆	133
3.6.8 Disjoncteurs dans le vide	135
3.7 Limiteurs de surtension	136
3.8 Transformateurs	138
3.8.1 Couplage des enroulements	143
3.8.2 Courant magnétisant	146
3.8.3 Courant d'appel du transformateur à la mise sous tension	149
3.8.4 Essais « à vide » et en « court-circuit »	151

3.9	Ouvrages pour le transport de l'énergie électrique	152
3.9.1	Lignes « aériennes »	154
3.9.2	Câbles « souterrains »	168
3.9.3	Lignes de transport à isolation gazeuse	174
3.10	Transport en courant continu à haute tension	175
	Exercices	184
	Références bibliographiques	185
Chapitre 4	• Utilisation de l'énergie électrique	187
4.1	Introduction	187
4.2	Types de charges	188
4.2.1	Conversion électromécanique	189
4.2.2	Systèmes d'éclairage	195
4.2.3	Systèmes de chauffage	197
4.2.4	Systèmes d'alimentation en continu	197
4.2.5	Énergie électrochimique	200
4.3	Classification des utilisateurs du réseau	201
4.3.1	Charges résidentielles	201
4.3.2	Charges commerciales et industrielles	204
4.3.3	Traction électrique ferroviaire	205
	Exercices	207
	Références bibliographiques	208
Chapitre 5	• Contrôle du réseau électrique	209
5.1	Introduction	209
5.2	Principes de base du contrôle du réseau électrique	212
5.3	Contrôle de la puissance active et de la fréquence	214
5.3.1	Réglage primaire (équilibre en puissance)	214
5.3.2	Réglage secondaire (LFC en anglais pour <i>Load Frequency Control</i>)	220
5.4	Contrôle de tension et puissance réactive	223
5.4.1	Régulation automatique de la tension du générateur (alternateur synchrone)	223
5.4.2	Transformateur « régulateur en charge » à changement de prises	226
5.4.3	Injection de puissance réactive	228
5.5	Contrôle du transfert de puissance	233
5.5.1	Contrôle des flux de puissance active	233
5.5.2	Contrôle des flux de puissance réactive	236
5.5.3	Contrôleur du flux de puissance unifié (UPFC pour <i>Unified Power Flow Controller</i>)	239
5.6	FACTS pour <i>Flexible AC Transmission Systems</i>	240

Exercices	241
Références bibliographiques	243
Chapitre 6 • Gestion du transit des puissances dans les réseaux électriques	245
6.1 Introduction	245
6.2 Transit de puissance	246
6.2.1 Mise en équation de transit de puissance	247
6.2.2 Résolution du système d'équations du transit de puissance par la méthode de Newton-Raphson	257
6.2.3 Méthode de calcul du transit de puissance par découplage	261
6.2.4 Transit de puissance DC	266
6.3 Transit de puissance optimal	269
6.4 Estimateur d'état	270
6.4.1 Schéma général de l'estimateur d'état	273
6.4.2 Analyse des données erronées	275
6.4.3 Analyse statistique de l'estimateur d'état	281
Exercices	285
Références bibliographiques	287
Chapitre 7 • Marché de l'électricité	289
7.1 Introduction	289
7.2 Structure du marché de l'électricité	290
7.2.1 Transport et distribution	291
7.2.2 Architecture du marché	291
7.3 Marché de compensation	293
7.4 « Bien-être social »	296
7.5 Couplage des marchés	298
7.6 Mécanisme d'allocation et définition des types de marchés	304
Références bibliographiques	306
Chapitre 8 • Évolutions futures des réseaux électriques	307
8.1 Introduction	307
8.2 Énergie renouvelable	308
8.3 Production d'énergie électrique locale	309
8.4 Convertisseurs d'électronique de puissance comme interfaces	313
8.5 Stockage d'énergie	314
8.6 « Black-out » et phénomènes chaotiques	315
8.6.1 Phénomènes non linéaires et chaotiques	315
8.6.2 Black-out	319
Références bibliographiques	326

Annexe A • Équations de Maxwell	329
A.1 Introduction	329
A.2 Développement limité	331
A.3 Champ électromagnétique quasi statique dans un condensateur plan	333
A.3.1 Solution en régime quasi statique	334
A.3.2 Validation de l'approximation quasi statique	336
A.4 Modèle quasi statique pour une inductance à une spire	338
A.4.1 Solution en régime quasi statique	338
A.4.2 Validation de l'approximation quasi statique	340
A.5 Modèle quasi statique pour une résistance	342
A.5.1 Solution en régime quasi statique	343
A.6 Application à la modélisation	346
Références bibliographiques	346
Annexe B • Modélisation du transformateur de puissance	347
B.1 Introduction	347
B.2 Transformateur parfait	348
B.3 Bobines couplées magnétiquement	351
B.3.1 Équivalence avec le transformateur parfait	354
B.4 Modélisation du transformateur avec prise en compte des fuites magnétiques	355
B.5 Modèles du transformateur triphasé	358
Annexe C • Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné	361
C.1 Introduction	361
C.2 Principes physiques	362
C.3 Machine synchrone monophasée	367
C.4 Machine synchrone triphasée	373
C.5 Machine synchrone couplée au réseau	377
Annexe D • Modélisation de la machine asynchrone	381
D.1 Introduction	381
D.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	382
D.2.1 Rotor à un seul enroulement	384
D.2.2 Rotor à deux enroulements	387
D.2.3 Rotor en rotation	388
D.3 Étude du champ magnétique dans l'entrefer	389
D.3.1 Contribution des courants rotoriques à l'induction dans l'entrefer	389
D.3.2 Flux créé par les enroulements du stator	393

D.4	Modèle équivalent monophasé	393
D.4.1	Équations des tensions au stator	394
D.4.2	Modèle équivalent avec deux bobines couplées	395
D.4.3	Évolution du modèle équivalent vers le modèle « usuel »	396
D.5	Machine asynchrone connectée au réseau électrique	397
Annexe E	• Modélisation des lignes et des câbles	399
E.1	Introduction	399
E.2	Modélisation d'une ligne de grande longueur	399
E.3	Modélisation d'une ligne de longueur moyenne	404
E.4	Modélisation d'une ligne courte	405
E.5	Comparaison des modèles en fonction de la longueur de la ligne	406
E.6	Modélisation d'un câble	408
	Solutions	409
	Index	425



Préface

Dans le domaine de l'analyse des systèmes électriques de conversion d'énergie, de très nombreuses publications d'un excellent niveau sont disponibles. Dans cet ouvrage, nous avons suivi à peu près la même « ligne éditoriale » que la majorité d'entre elles. Cependant, nous n'avons pas souhaité développer les modèles (valables en régime permanent) dans le cours du livre, mais des explications sont dans les annexes. Ainsi, dans l'ensemble des chapitres, nous nous intéressons à l'organisation et au fonctionnement d'une partie et/ou de l'ensemble du réseau électrique. Ainsi, les annexes contribuent au livre en offrant des éléments de réflexion complémentaires au texte principal. De plus, ce livre contient un grand nombre d'exercices dont les solutions détaillées sont présentées dans un chapitre séparé. Ce qui suit est un bref résumé du contenu des chapitres et des annexes.

Chapitre 1 (Outils mathématiques pour l'analyse des réseaux électriques)

Ce premier chapitre est une introduction à l'étude des « réseaux électriques » et fournit des éléments pour l'analyse en régime permanent. Nous posons (et répondons) aux questions telles que « pourquoi AC ? », « pourquoi 50 ou 60 Hz ? », « pourquoi des formes d'ondes sinusoïdales ? », « pourquoi un système triphasé ? ». Les bases d'une analyse en régime permanent des réseaux triphasés équilibrés sont décrites, telles que les phaseurs, les schémas équivalents monophasés, les notions de puissance active, puissance réactive, puissance complexe et facteur de puissance. Nous présentons aussi la normalisation unitaire.

Chapitre 2 (Physique des centrales électriques)

La conversion d'une source d'énergie primaire en énergie électrique est le sujet de ce chapitre. Les sources d'énergie primaire peuvent être les combustibles fossiles tels

que le gaz, le pétrole et le charbon ou l'uranium, mais ils peuvent aussi provenir de sources renouvelables (énergie éolienne, hydroélectrique, solaire ou géothermique). Afin de comprendre la nature d'une centrale thermique, qui est une contributrice importante dans la production de l'énergie électrique, nous présentons brièvement les principes de la thermodynamique. La conversion finale de l'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée par la machine synchrone (en alternateur), ainsi, nous analysons son couplage avec le réseau et les modes d'injection de puissance.

Chapitre 3 (Transport et distribution de l'énergie électrique)

Les réseaux de transport et de distribution sont formés par des lignes aériennes, des câbles souterrains, des transformateurs et des sous-stations situées entre les points d'injection de puissance et de consommation d'énergie. Nous présentons divers concepts de sous-station, ainsi que leurs composants et les systèmes de protection. Nous analysons aussi plus en détail les principes de fonctionnement des transformateurs, des lignes, des câbles de transport et des systèmes de protection tels que les parafoudres, les fusibles et les disjoncteurs. Nous faisons une étude approfondie du transformateur ainsi que des lignes qui sont la partie la plus visible des réseaux électriques. Les câbles souterrains sont également étudiés avec une analyse en regard de celle faite sur les lignes. Le chapitre se termine sur les principes de la transmission HVDC (HVDC pour *High Voltage Direct Current* que l'on peut traduire par « haute tension continue »).

Chapitre 4 (Utilisation de l'énergie électrique)

Le système d'alimentation est conçu et agencé de manière à ce que la demande en électricité soit satisfaite à tout instant. Les consommateurs reçoivent la quantité de puissance active et réactive demandée à une fréquence constante et à un niveau de tension constante. Une charge transforme, en réalité, l'énergie électrique alternative en une autre forme d'énergie. L'accent est mis sur les différents types de charges qui transforment l'énergie électrique AC en énergie mécanique (moteurs synchrones et asynchrones), en lumière, en chaleur, en énergie électrique DC (redresseurs), et en énergie chimique. Après cela, les charges sont regroupées et classées selon trois catégories : les charges résidentielles (principalement monophasées), les charges commerciales et industrielles (souvent triphasées) et les systèmes de traction électrique ferroviaires (DC ou AC monophasé).

Chapitre 5 (Contrôle du réseau électrique)

Des actions de contrôle sont réalisées en permanence pour équilibrer la balance entre les puissances demandées par les charges et celles produites et pour maintenir les niveaux de tension et la fréquence aux valeurs spécifiées. Nous montrons qu'il y a une forte corrélation entre d'un côté les angles de décalage des tensions et les puissances actives et d'un autre côté entre les puissances réactives et les niveaux de tension. La balance des puissances est réalisée (contrôle primaire) ainsi que la minimisation de l'écart de fréquence du système (contrôle secondaire) en contrôlant la puissance active en sortie des générateurs (très souvent des alternateurs). Les niveaux de tension sont contrôlés soit localement, en agissant sur la valeur du

courant d'excitation des génératrices (dans le cas où ce sont des alternateurs), soit à des points fixes du réseau où sont connectés les transformateurs changeurs de prises, les batteries de condensateurs ou d'autres consommateurs/producteurs d'énergie réactive. Les systèmes de transmission « FACTS » sont de grands dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour le contrôle de la puissance réactive et de la tension (souvent en connexion en dérivation) ou pour le contrôle des flux de puissance active (souvent en connexion série).

Chapitre 6 (Gestion du transit des puissances dans les réseaux électriques)

Le transport et la distribution de l'énergie électrique sont surveillés, coordonnés et contrôlés dans des centres spécifiques. Le système de gestion de l'énergie « EMS » (pour *Energy Management System*) est l'interface entre l'opérateur et les réseaux d'alimentation réels. Le système de supervision et d'acquisition de données « SCADA » (pour *Supervisory Control And Data Acquisition*) collecte les données mesurées en temps réel et sont gérées par l'opérateur qui peut ainsi contrôler les composants des réseaux. L'« EMS » est en fait une extension des fonctionnalités de base du système « SCADA » et comprend des outils pour l'analyse et le fonctionnement optimal du réseau d'alimentation. L'estimateur d'état sert de « filtre » pour les données de mesure collectées car il détermine l'état physique du réseau qui correspond le mieux aux mesures disponibles. Ceci est une entrée nécessaire pour d'autres programmes d'analyse dans l'« EMS », tels que les calculs des transits de puissance qui sont primordiaux pour avoir une « vision » globale du réseau en temps réel aussi fiable que possible. La résolution des équations associées à ces calculs de transit de puissance est faite en utilisant la méthode « classique » de Newton-Raphson, mais nous présentons aussi la méthode dite « par découplage » et celle dite « DC ».

Chapitre 7 (Marché de l'électricité)

Au niveau conceptuel, il existe un « modèle de marché commun » qui prévoit à la fois des opérations, sur le marché au comptant, coordonnées par des opérateurs de marché et de réseau et des accords contractuels bilatéraux programmés par les mêmes entités. Le marché au comptant est basé sur un modèle d'enchères qui sont traitées dans des bourses d'électricité. L'équilibre du marché se produit lorsque l'équilibre économique entre tous les participants est satisfait et que les avantages pour la société, appelés « bien-être sociaux », sont à leur maximum. Le réseau électrique est un vaste système interconnecté. Ceci signifie que plusieurs zones de marché sont physiquement liées entre elles, ce qui facilite l'exportation de l'électricité des zones à bas prix vers les zones à prix élevé.

Chapitre 8 (Évolutions futures des réseaux électriques)

Dans ce chapitre, nous faisons quelques développements provenant des complexes enjeux technologiques, écologiques, sociologiques et politiques et de leurs conséquences possibles sur le système électrique. Par exemple, une mise en œuvre à grande échelle de la production d'électricité à partir de sources renouvelables entraînera des changements structurels dans les réseaux de distribution et de transport existants. Beaucoup de ces unités de production sont décentralisées, plutôt de faible puissance

et sont souvent connectées aux réseaux de distribution au moyen d'une interface d'électronique de puissance. Une transition de la structure des réseaux électriques d'alimentation « verticale » vers une structure « horizontale » n'est pas improbable. Le stockage de l'énergie peut être utilisé pour stabiliser les grandes fluctuations de puissance lorsque l'énergie est produite par des sources d'énergies renouvelables intermittentes. La complexité du système augmente en raison de l'utilisation des dispositifs « FACTS », des interfaces d'électroniques de puissance et des générateurs de production d'énergie intermittente. Ainsi, des phénomènes chaotiques et des pannes de grande ampleur (black-out) sont susceptibles de se produire plus souvent dans un proche avenir.

Annexe A (Équations de Maxwell)

La théorie des circuits peut être considérée comme décrivant une classe restreinte des solutions des équations de Maxwell auxquelles sont appliqués des développements limités. On montre que les développements à l'ordre zéro et au premier ordre (pour décrire des champs quasi statiques) constituent la base de la théorie des circuits à constantes localisées. Au moyen des termes du second ordre, la validité de cette théorie peut être estimée à diverses fréquences. C'est la « taille électrique » de la structure (la taille est définie en termes de longueur d'onde minimale) qui dicte la sophistication et la complexité du modèle requis. Nous définissons un critère reliant les dimensions de la structure électromagnétique à la plus petite longueur d'onde considérée, de sorte que la validité du modèle puisse être vérifiée.

Annexe B (Modélisation du transformateur de puissance)

Les transformateurs sont essentiellement constitués de deux bobines placées autour d'un noyau ferromagnétique qui augmente leur couplage magnétique. Dans cette annexe, nous faisons la présentation des équations de fonctionnement du transformateur. Tout d'abord, nous nous intéressons au cas du transformateur idéal et de la transformation d'impédance. Après cela, un modèle est développé avec une description plus générale du transformateur au moyen de bobines couplées magnétiquement. Ensuite, afin de modéliser le comportement non idéal du transformateur nous prenons en compte les flux de fuite, les pertes dans les enroulements et celles dans le circuit magnétique. Pour finir, nous proposons un schéma équivalent du transformateur. Cette annexe se termine par une vue d'ensemble des modèles équivalents monophasés de transformateurs triphasés.

Annexe C (Modélisation de machine synchrone à rotor bobiné)

Une machine synchrone génère de l'électricité en convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les deux parties de base de la machine synchrone sont le rotor (où se situe le circuit d'excitation) et le stator (où se situent les bobinages de l'induit). Le rotor magnétique est équipé d'un enroulement excité en courant continu et agit comme un électro-aimant. Lorsque le rotor tourne et que l'enroulement du rotor est alimenté, un champ magnétique tournant est présent dans l'entrefer entre le rotor et le stator. L'induit possède un système d'enroulements triphasés dans lequel des FEM variables dans le temps sont générées par le champ

magnétique tournant. Pour l'analyse du comportement de la machine synchrone connectée au réseau, une description qualitative seule n'est pas suffisante. C'est la raison pour laquelle nous proposons une description mathématique des relations tension-courant de cette machine. Sur la base de ces relations, nous proposons un modèle monophasé équivalent. Pour finir ce chapitre, nous étudions le comportement de la machine synchrone connectée à un réseau de puissance apparente de court-circuit infinie en mode générateur et en mode moteur.

Annexe D (Modélisation de la machine asynchrone)

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif qui est très bien adaptée pour être utilisée comme moteur lorsqu'elle est directement alimentée par le réseau. Le stator possède un système d'enroulements triphasés et le rotor est équipé d'enroulements en court-circuit. Lorsque la vitesse du rotor est différente de la vitesse du champ magnétique tournant généré par les enroulements du stator, les enroulements du rotor sont exposés à un champ magnétique variable et sont le siège de courants induits. Ces derniers associés au champ du stator tournant créent un couple électromagnétique qui entraîne en rotation le rotor dans le même sens que celui du champ statorique. L'élément central de cette annexe est la description mathématique des relations tension-courant et des relations couple-courant de la machine asynchrone qui permettent d'établir un modèle monophasé équivalent.

Annexe E (Modélisation des lignes et des câbles)

Lorsque nous parlons d'électricité, nous pensons aux courants qui circulent dans les conducteurs des lignes de transport aériennes et des câbles souterrains entre les générateurs et les charges. Cette approche est valable parce que les dimensions physiques des réseaux électriques d'alimentation sont généralement faibles par rapport à la longueur d'onde des courants et des tensions dans l'analyse en régime permanent. Cela nous permet d'appliquer les lois de tension et de courant de Kirchhoff et d'utiliser des éléments localisés dans notre modélisation des lignes et des câbles. Nous pouvons distinguer quatre paramètres : la résistance série (due à la résistivité du conducteur), l'inductance (due au champ magnétique entourant les conducteurs), la capacité (due au champ électrique entre les conducteurs) et la conductance shunt (due aux courants de fuite). Trois modèles différents, dépendants de la longueur de la ligne, sont développés pour l'analyse des transferts de puissance dans les réseaux.

Au cours de la rédaction de ce livre, nous avons parfois eu envie de travailler comme si nous réalisions un film, en mettant l'accent sur des sujets sélectionnés et en faisant parfois des zooms, car il y a toujours un équilibre délicat à trouver entre la chose que vous voulez clarifier et la profondeur de l'explication pour l'atteindre. Nous espérons que nous avons atteint cet objectif et que ce livre vous aidera dans vos réflexions sur ce sujet passionnant qu'est l'étude des réseaux d'énergie électrique !

En écrivant ce livre, nous avons utilisé avec gratitude les notes de cours de l'Université de technologie de Delft et de l'Université de technologie d'Eindhoven aux Pays-Bas. Les annexes sur la modélisation du transformateur, de la machine synchrone et de la machine asynchrone sont basées sur l'excellent manuel néerlandais du Dr Martin

Hoeijmakers sur la conversion de l'énergie électrique. Nous sommes très reconnaissants de la lecture attentive du manuscrit des professeurs émérites Koos Schot, Robert van Amerongen et Jan Heijde-man. Nous remercions Ton Kokkelink et Rene Beune, membres de la société TenneT TSO B.V., pour leurs précieux commentaires sur les chapitres 5 et 7. Nous avons apprécié la contribution aux problèmes et à leurs solutions de Romain Thomas et du Dr Laura Ramirez Elizondo.

Pieter H. Schavemaker

Lou van der Sluis

Ouvrage traduit par :

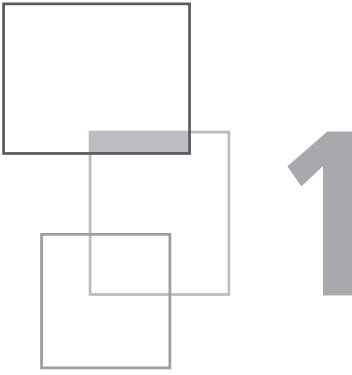
Emmanuel Hoang

Professeur agrégé de génie électrique à l'École normale supérieure Paris-Saclay

Habilité à diriger des recherches et chercheur associé au laboratoire SATIE

Assisté pour la correction orthographique et grammaticale de :

Ambre Hoang



Outils mathématiques pour l'analyse des réseaux électriques

1.1 Introduction

L'électricité est présente sur toutes nos prises « de courant », à tout instant et depuis un temps qui nous semble très lointain. Elle est si pratique et si peu chère, que l'on n'imagine pas pouvoir vivre sans elle. Aux Pays-Bas, par exemple, il y a eu en moyenne 35 minutes de « coupures » durant l'année 2006. Avec environ 8 760 heures dans une année, cela représente une disponibilité de 99,99334 % !

La dépendance de nos sociétés à l'électricité est telle que nous ne pourrions pas vivre sans « elle ». Voici quelques exemples de situations si l'électricité venait à manquer :

- nous ne pourrions pas faire le « plein » de nos voitures avec des pompes à essence commandées électriquement ;
- nous ne pourrions pas faire nos courses, car les portes des magasins et des centres commerciaux ne pourraient pas s'ouvrir ;
- les trains, les métros, les tramways, resteraient à quai ;
- nos villes resteraient dans l'obscurité ;
- nos réfrigérateurs dégivèraient ;
- il n'y aurait ni chauffage, ni climatisation ;

- nous ne pourrions plus retirer d'argent aux distributeurs ;
- les ordinateurs ne fonctionneraient pas très longtemps ;
- l'eau courante ne serait plus distribuée.

La liste est infinie. Nous voulons simplement exprimer le fait que l'électricité est indispensable à nos sociétés modernes (voir figure 1.1) et que probablement le chaos s'installerait si l'électricité venait à manquer durablement.

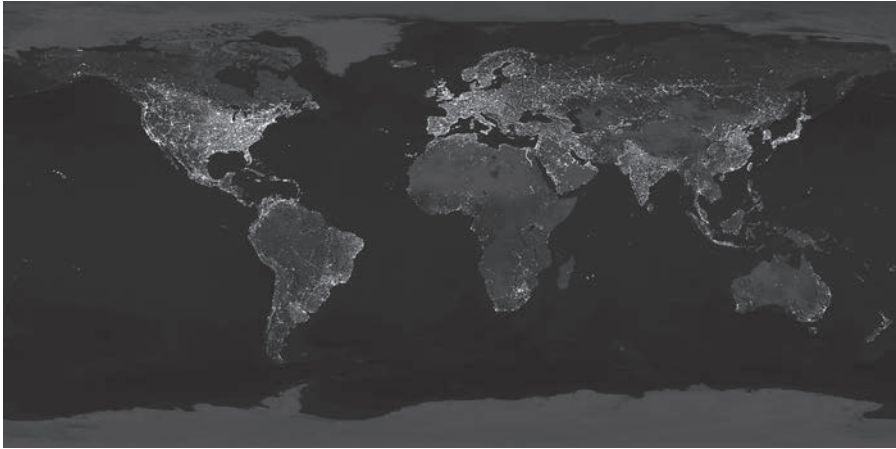


Figure 1.1 La Terre des villes éclairées électriquement. (Reproduction autorisée par la NASA.)

Nos sociétés ont besoin de chercheurs et d'ingénieurs qui puissent penser, dimensionner, construire et commander notre système électrique et ses constituants.

Ainsi nous vous invitons à comprendre ce qui se cache derrière la prise « de courant »...

1.2 Un peu de physique

L'étude du système électrique qui va de la production de l'électricité à son utilisation, en passant par le transport et la distribution, est une tâche immense, trop grande pour être traitée dans un seul ouvrage. En effet, le système électrique est un système physique qui peut être étudié dans différentes échelles de temps :

- de la seconde à plusieurs années : les phénomènes physiques sont stabilisés et l'on parle de « régime permanent » ;
- de la milliseconde à la dizaine de milliseconde : ce sont les phénomènes mécaniques et électriques des constituants du système électrique qui interviennent

T

TCR (Thyristor-controlled reactor) 229, 230, 231, 236, 237, 238

TCSC (Thyristor-controlled series capacitor) 236, 237, 238, 240

Tension composée 36, 37, 44, 58, 59, 233, 234

Tension d'effondrement 318

Tension entre phases 36, 37, 66, 201, 242

Tension simple 36, 37, 44, 46, 58, 59, 66, 173, 242, 407

Théorème d'Ampère 147, 348, 362, 374

Thermodynamique 12, 72, 73, 76

Thyristor 176, 177, 181, 182, 199, 229, 230, 231, 236, 240

Traction 12, 29, 153, 188, 189, 201, 205, 206, 207, 208, 415

Traction électrique ferroviaire 201, 205

Transformateur 12, 14, 15, 20, 25, 26, 60, 61, 62, 69, 117, 122, 123, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 179, 184, 201, 202, 203, 207, 226, 227, 233, 234, 235, 241, 243, 247, 307, 313, 317, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 395, 396, 407, 417, 418, 419, 420

Transformateur « régleur en charge » 226

Transformateur à changement de prises 226, 227, 317

Transformateur déphaseur 233, 234, 235

Transformateur monophasé 61, 138, 141, 143, 147, 348, 349, 357, 358

Transformateur parfait 61, 62, 151, 226, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358

Transformateur triphasé 141, 142, 143, 144, 145, 150, 184, 358, 359

Transformateur Y-d 143

Transformateurs de mesure 115

Transformation étoile-triangle 47

Transit de puissance 13, 246, 247, 248, 251, 252, 253, 254, 257, 258, 259, 261, 263, 264, 265, 266, 267, 269, 270, 271, 274, 275, 285, 286, 423

TSC (Thyristor-switched capacitor) 229, 231

TSO (Transmission System Operator) 16, 72, 83, 112, 116, 117, 142, 153, 156, 157, 206, 221, 228, 291

Turbine Francis 88

Turbine hydraulique 87

Turbine Kaplan 88

U

UPFC (Unified powerflow controller) 233, 239, 240

V

Vecteur de Poynting 20, 21

VSC (Voltage-source converter) 182, 231, 232, 239

PROfil

Le réseau électrique dans son intégralité

Pieter Schavemaker et Lou van der Sluis
Traduction de Emmanuel Hoang

Dans ce livre, les auteurs, deux enseignants spécialistes du « génie électrique », donnent envie de comprendre le mystère de la « fée électricité » à laquelle Raoul Dufy rend hommage dans une œuvre majestueuse abritée par le musée d'art moderne de la ville de Paris. Pieter Schavemaker et Lou van der Sluis ont eu à cœur de rendre cette science accessible et attrayante pour le lecteur en appréhendant les éléments théoriques au travers d'exemples pratiques et concrets.

Ainsi, lecteurs, vous pourrez contribuer à votre tour au « développement soutenable » de la société à l'aide de projets innovants dans le domaine de la production, du transport et de la transformation de l'énergie électrique. Ce livre est accessible à toutes les personnes ayant un niveau d'étude post baccalauréat. Bien adapté aux étudiants de licence, de section de techniciens supérieurs, d'IUT, de master 1 et 2 et d'école d'ingénieurs, ainsi qu'aux personnes souhaitant compléter leur formation initiale.

« Le réseau électrique dans son intégralité » aborde les thématiques suivantes :

- les connaissances de base pour maîtriser les concepts du transport de l'électricité,
- les types de centrales électriques, de la centrale « nucléaire » aux centrales solaires, ainsi que la machine synchrone à rotor bobiné
- le réseau électrique et ses constituants comme par exemple les lignes « aériennes », les disjoncteurs, et le transformateur,
- les charges comme par exemple les systèmes de traction électrique ferroviaires ou la machine asynchrone,
- les modes de régulation,
- les « transits » de puissances dans les réseaux électriques à l'aide d'outils mathématiques adéquats,
- les mécanismes d'ajustement utilisés dans la gestion des réseaux électriques,
- les évolutions futures comme le stockage de l'énergie.

Pour compléter cet ouvrage, des annexes présentent plus en détails les modélisations du transformateur de puissance, des machines synchrone et asynchrone et des lignes, ainsi qu'un bel exemple d'utilisation pratique des équations de Maxwell

Pieter Schavemaker, Directeur général de « E-Bridge Consulting B.V. », travaille dans le secteur de l'énergie depuis 20 ans. Pieter possède une expérience variée en tant que professeur adjoint à l'Université de technologie de Delft (Delft University of Technology), auprès d'un grand fabricant d'équipements de système d'alimentation (ABB), auprès d'un gestionnaire de réseau de transport (Tennet TSO) et en tant que consultant.

Lou van der Sluis, Professeur émérite dans le département « Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Sciences (EEMCS) » de l'Université de technologie de Delft.

Emmanuel Hoang, Professeur agrégé de génie électrique à l'École normale supérieure Paris-Saclay, est habilité à diriger des recherches et chercheur associé au laboratoire SATIE.

978-2-7598-2227-0



edp sciences
www.edpsciences.org

Les ouvrages de la collection PROfil ont pour vocation la transmission des savoirs professionnels dans différentes disciplines. Ils sont rédigés par des experts reconnus dans leurs domaines et contribuent à la formation et l'information des professionnels.