

---

collection dirigée par Jean-Claude Sabonnadière

---

# Les réseaux d'énergie électrique 1

*modélisation des éléments du réseau triphasé*

Valentin Crastan

 hermes

Lavoisier

---

---

ECT68/VOL. 1

36.A30

②

# Les réseaux d'énergie électrique 1

*modélisation des éléments du réseau triphasé*



Valentin Crastan

**Hermes**  
**Science**  
— publications —

*Lavoisier*

# Table des matières

<b>Partie I Introduction, bases</b> .....	1
<b>Chapitre 1. Introduction, UCTE</b> .....	3
1.1 Structure de base des réseaux d'énergie électrique .....	4
1.2 Organisation de l'économie électrique en Europe (aperçu historique, jusqu'à environ 1995) .....	6
1.3 Échanges d'énergie électrique en Europe .....	10
1.3.1 UCPTE (1951-1999) .....	10
1.3.2 UCTE (depuis 1999) .....	12
<b>Chapitre 2. Bases électrotechniques</b> .....	15
2.1 Courant triphasé, puissance triphasée .....	15
2.1.1 Courant alternatif ou courant continu .....	15
2.1.2 Courant triphasé .....	15
2.1.3 Courant triphasé ou courant monophasé .....	17
2.1.4 Puissances apparente, active et réactive en circuit triphasé .....	17
2.1.5 Puissance momentanée de phase .....	18
2.1.6 Puissance momentanée triphasée .....	20
2.2 Grandeurs nominales, systèmes p.u. ....	21
2.3 Systèmes triphasés symétriques .....	24
2.3.1 Schéma équivalent .....	24
2.3.2 Quadripôles (biportes) .....	26
2.3.3 Calcul de la chute de tension et des pertes .....	28
2.4 Phaseurs et composantes en triphasé .....	30
2.4.1 Phaseurs en alternatif monophasé .....	30
2.4.2 Représentation de phénomènes dynamiques .....	31
2.4.3 Représentation du système triphasé avec phaseur spatial .....	32
2.4.4 Phaseur spatial et composantes symétriques .....	34
2.4.5 Phaseur spatial et composantes $\alpha\beta 0$ .....	35
2.4.6 Phaseur et composantes de Park .....	36
2.5 Le champ électromagnétique .....	39
2.5.1 Équations du champ .....	39
2.5.2 Énergie du champ .....	41

2.5.3	Potentiels du champ .....	42
2.5.4	Champ dans un diélectrique .....	42
2.5.5	Champ de conduction .....	42
2.5.6	Champ magnétique .....	43
2.5.7	Champ magnétique de conducteurs filiformes .....	44
2.5.8	Circuit électromagnétique technique .....	48
2.5.9	Forces électromagnétiques .....	50
<b>Chapitre 3. Bases de la technique des hautes tensions .....</b>		<b>53</b>
3.1	Hautes tensions dans les réseaux d'énergie .....	53
3.1.1	Tensions normalisées, tensions d'essais et de tenue .....	53
3.1.2	Décharge de la foudre .....	57
3.1.3	Surtensions internes .....	60
3.1.4	Objet de la technique des hautes tensions .....	60
3.2	Rigidité diélectrique de la matière isolante .....	61
3.2.1	Claquage, décharges partielles .....	61
3.2.2	Comportement dans le champ uniforme .....	62
3.2.3	Comportement dans le champ non-uniforme .....	63
3.3	Calcul des champs électriques .....	64
3.3.1	Bases .....	64
3.3.2	Méthode des éléments finis .....	66
3.3.3	Méthodes par superposition .....	69
3.3.4	Configurations simples avec deux électrodes .....	71
3.3.5	Effets des charges d'espace .....	79
3.4	Schéma équivalent du diélectrique .....	81
3.4.1	Modèle élémentaire .....	81
3.4.2	Phénomènes de polarisation et modèles plus exacts .....	82
3.5	Isolations hétérogènes .....	85
3.5.1	Mise en série d'isolants .....	85
3.5.2	Mise en parallèle d'isolants .....	87
3.5.3	Couches cylindriques et sphériques .....	88
3.5.4	Isolants poreux imprégnés .....	89
3.6	Décharges disruptives dans les gaz .....	90
3.6.1	Les gaz dans les petits champs électriques (V/cm) .....	90
3.6.2	Comportement aux grandes intensités de champ (kV/cm) .....	91
3.6.3	Explication physique de la fonction de ionisation par chocs .....	93
3.6.4	Mécanisme de l'amorçage .....	94
3.6.5	Calcul du claquage en champ uniforme .....	97
3.6.6	Calcul de l'amorçage en champ non-uniforme .....	102
3.6.7	Comportement après amorçage .....	107

3.7	Décharges disruptives dans les gaz en champ fortement non-uniforme .....	108
3.7.1	Décharges partielles .....	108
3.7.2	Mécanisme de claquage .....	109
3.7.3	Influence de la distance entre les électrodes sur la tension de claquage .....	113
3.7.4	Influence de la pression .....	115
3.7.5	Influence du temps de décharge .....	117
3.8	Isolants liquides et solides .....	118
3.8.1	Isolants liquides .....	118
3.8.1.1	Types et applications .....	118
3.8.1.2	Décharges disruptives dans l'huile minérale .....	118
3.8.2	Isolants solides .....	119
3.8.2.1	Types et emploi .....	119
3.8.2.2	Caractéristiques mécaniques et thermiques .....	119
3.8.2.3	Propriétés électriques .....	121
3.8.2.4	Comportement au claquage .....	121
3.9	Claquage par contournement et glissement .....	124
<b>Partie II Éléments du réseau triphasé et leur modélisation .....</b>		<b>129</b>
<b>Chapitre 4. Transformateurs .....</b>		<b>131</b>
4.1	Construction .....	131
4.2	Modes de couplage des transformateurs triphasés .....	134
4.3	Modèles du transformateur .....	136
4.3.1	Physique du transformateur .....	136
4.3.2	Schémas équivalents .....	137
4.4	Détermination des paramètres du transformateur .....	141
4.4.1	Essai à vide .....	141
4.4.2	Essai en court-circuit .....	142
4.4.3	Paramètres du transformateur .....	143
4.5	Matrices stationnaires et modèles dynamiques .....	145
4.5.1	Matrices stationnaires .....	145
4.5.2	Modèles dynamiques .....	146
4.6	Comportement à l'enclenchement et en régime permanent .....	148
4.6.1	Enclenchement .....	148
4.6.2	Chute de tension .....	150
4.6.3	Rendement .....	152
4.6.4	Marche en parallèle .....	154

4.7	Autotransformateurs	155
4.7.1	Principe	155
4.7.2	Schéma équivalent	156
4.8	Transformateurs à rapport variable	157
4.8.1	Transformateurs ajustables	157
4.8.2	Transformateurs réglables	158
4.9	Transformateurs des réseaux d'énergie	159
4.9.1	Transformateurs de centrale et de sous-station	159
4.9.2	Transformateurs de couplage de réseaux	160
4.9.3	Transformateurs de distribution	160
4.9.4	Transformateurs spéciaux	162
4.9.4.1	Transformateurs à trois enroulements	162
4.9.4.2	Transformateurs déphaseurs	163
4.9.4.3	Transformateurs de mesure (réducteurs)	165
<b>Chapitre 5. Lignes électriques</b>		167
5.1	Types et structure	167
5.1.1	Lignes aériennes	168
5.1.2	Câbles	170
5.2	Théorie des lignes	173
5.2.1	Bases physiques	173
5.2.2	Équations de la ligne	173
5.2.3	Interprétation de la solution, propagation d'ondes	177
5.3	Schémas équivalents	180
5.3.1	Ligne longue du point de vue électrique	180
5.3.2	Ligne courte du point de vue électrique	181
5.4	Caractéristiques des lignes	184
5.4.1	Résistance linéique par phase	184
5.4.2	Inductance des systèmes à plusieurs conducteurs	185
5.4.3	Inductance linéique (cyclique) de la ligne triphasée simple	188
5.4.4	Inductance linéique de la ligne aérienne à deux ternes	189
5.4.5	Inductance linéique du câble triphasé	191
5.4.6	Capacités des systèmes à plusieurs conducteurs	191
5.4.7	Coefficients de potentiel des lignes aériennes	194
5.4.8	Capacités linéiques des lignes aériennes à un terne	196
5.4.9	Capacités linéiques des lignes aériennes à deux ternes	198
5.4.10	Influence des fils de garde	199
5.4.11	Capacité linéique des câbles	200
5.4.12	Conductance linéique	200
5.4.13	Exposant de propagation et impédance caractéristique	200
5.5	Matrices du biporte en p.u.	209

5.6	Modèles dynamiques	210
5.6.1	Modèles à paramètres constants pour valeurs momentanées	210
5.6.2	Fonction de transfert et fréquences propres de la ligne	214
5.6.3	Approximation rationnelle de la ligne sans distorsion	216
5.6.4	Modèles dynamiques de la ligne électriquement courte	218
5.6.5	Modèle avec phaseurs de la ligne sans distorsion	220
<b>Chapitre 6. Générateurs synchrones</b>		223
6.1	Structure et principe de la machine synchrone (MS)	223
6.2	Marche à vide	229
6.2.1	Enroulement d'excitation et circuit magnétique	229
6.2.2	Champ dans l'entrefer	229
6.2.3	Flux polaire et résistance magnétique principale	231
6.2.4	Tension induite à vide (tension polaire)	231
6.2.5	Caractéristiques et schéma équivalent stationnaire à vide	232
6.2.6	Dynamique de l'enroulement d'excitation	233
6.3	Charge stationnaire	235
6.3.1	Champ tournant statorique	235
6.3.2	Champ résultant	236
6.3.3	Flux principal de la machine à rotor lisse idéale	237
6.3.4	Tension induite principale de la machine à rotor lisse idéale	238
6.3.5	Diagramme vectoriel stationnaire de la machine à rotor lisse idéale	239
6.3.6	Théorie des deux axes de la MS réelle	240
6.3.7	Diagramme vectoriel de la MS réelle	242
6.3.8	Couple moteur et puissance active	245
6.3.9	Effet de la saturation, caractéristique en charge, $\cos\phi = 0$	246
6.4	Dynamique de la MS	247
6.4.1	Machine théorique sans effets amortisseurs	248
6.4.1.1	Schémas équivalents	248
6.4.1.2	Schémas fonctionnels	251
6.4.1.3	État transitoire	253
6.4.1.4	Comportement de la tension sous charge	254
6.4.1.5	Représentation p.u.	254
6.4.2	MS avec rotor feuilleté et enroulement amortisseur	255
6.4.2.1	Schémas équivalents	255
6.4.2.2	Schémas fonctionnels	260
6.4.2.3	États subtransitoire et transitoire	261
6.4.2.4	Comportement de la tension à la suite d'un choc de charge réactive	263
6.4.3	MS avec pôles massifs	263
6.4.4	Comportement en court-circuit	264

6.4.4.1	Court-circuit partant de vide, sans réglage de tension	264
6.4.4.2	Courant de court-circuit avec charge préliminaire	267
6.4.4.3	Effet du réglage de tension	268
6.5	Fonctionnement en îlot et réglage de la centrale	269
6.5.1	Marche en îlot de la MS	270
6.5.1.1	Comportement stationnaire	270
6.5.1.2	Comportement dynamique	273
6.5.1.3	Instabilité de la tension	278
6.5.2	Marche en parallèle de groupes et de centrales	280
6.5.2.1	Répartition de la puissance active	280
6.5.2.2	Centrales de réglage	282
6.5.2.3	Répartition de la puissance réactive	282
6.6	Marche en parallèle avec le réseau	283
6.6.1	Synchronisation	283
6.6.2	Puissance fournie par la MS à rotor cylindrique idéal	284
6.6.2.1	Puissance active	284
6.6.2.2	Analogie du ressort	286
6.6.2.3	Puissance réactive	287
6.6.2.4	Injection conjointe de puissances active et réactive	288
6.6.2.5	Stabilité statique	289
6.6.3	Diagramme de puissance de la MS à rotor cylindrique idéal	289
6.6.4	Puissance active et puissance réactive fournies par la machine synchrone réelle	291
6.6.5	Diagramme des puissances de la MS réelle	292
6.6.5.1	Limite de stabilité statique	293
6.6.5.2	Lieu à courant d'excitation constant	294
6.6.6	Effet d'une tension du réseau non rigide	294
6.6.7	Dynamique de la MS reliée au réseau rigide	296
6.6.7.1	Mouvement de la roue polaire	296
6.6.7.2	Dynamique des petites perturbations de la marche synchrone	297
6.6.7.3	Stabilité transitoire	301
6.7	Modèles p.u. dans l'espace d'état	303
6.7.1	Systèmes d'équations	303
6.7.1.1	Équations du stator	304
6.7.1.2	Équations du rotor	305
6.7.1.3	Équations du flux principal	306
6.7.1.4	Équation du couple	307
6.7.1.5	Équation mécanique	307
6.7.1.6	Systèmes d'équations p.u.	308
6.7.2	Modèle linéaire complet dans l'espace d'état	310
6.7.3	Détermination des paramètres	312
6.7.4	Modèle dans l'espace d'état avec t.t. externes.	314

6.8	Comportement en court-circuit avec t.t.	319
6.9	Modèle du couplage de la MS au réseau	323
<b>Chapitre 7. Consommateurs, électronique de puissance</b>		325
7.1	La machine asynchrone	325
7.1.1	Comportement stationnaire	326
7.1.2	Courant de court-circuit et démarrage	329
7.1.3	Dynamique de la MA	330
7.1.4	Puissances et couple	334
7.1.5	Modèle complet de la MA	337
7.1.6	Modèles sans t.t. statoriques	340
7.2	Modèles sommaires de la charge	345
7.3	Électronique de puissance	347
7.3.1	Pont triphasé à commutation assistée (non autonome)	348
7.3.2	Pont triphasé à commutation autonome	350
7.4	Qualité du réseau	352
<b>Chapitre 8. Postes de couplage</b>		357
8.1	Appareils	357
8.1.1	Coupage des circuits	357
8.1.2	Transformateurs de mesure	360
8.1.3	Limiteurs de courant	364
8.1.4	Autres appareils et installations	365
8.2	Montages et formes de construction	366
8.2.1	Poste (tableau) de distribution basse tension	366
8.2.2	Station de transformation MT/BT	366
8.2.3	Schémas des barres collectrices des postes MT et HT	368
8.2.4	Postes à moyenne tension	371
8.2.5	Postes à haute tension	372
8.3	Technique de commande et de protection	380
<b>Annexes</b>		381
<b>Annexe I Valeurs techniques pour les conducteurs des lignes électriques</b>		383
<b>Annexe II Solutions des exercices</b>		389
<b>Bibliographie</b>		401
<b>Glossaire</b>		405
<b>Index</b>		411

*Les réseaux d'énergie électrique* présente des systèmes techniques complexes dont le comportement peut être prédit de façon fiable par des processus de simulation. Ces derniers sont aujourd'hui implémentés dans de courts délais grâce aux progrès des méthodes par ordinateur. L'ouvrage présente une modélisation rigoureuse de la dynamique de toutes les parties de l'installation.

La libéralisation du marché de l'énergie électrique et la forte concurrence qui l'accompagne conduisent les entreprises à exploiter les réseaux jusqu'à leurs limites.

Ce premier volume donne un rappel précis des bases de l'électrotechnique et de la technique des hautes tensions qui sont essentielles pour les réseaux d'énergie électrique. Il traite ensuite de la structure des réseaux de transport et de distribution d'énergie, du principe de fonctionnement et de la modélisation détaillée de ses éléments.

#### *L'auteur*

Ingénieur de recherche et de développement, Valentin Crastan a été professeur de technique et doyen de la division électrotechnique à la Haute école spécialisée bernoise (Bienne, Suisse). Il est actuellement ingénieur-conseil dans le domaine de l'énergie.