

ISBN978-4-621-08898-2

C3054 ¥20000E

定価 (本体20,000円+税)



9784621088982



1923054200006

THEORY AND PRACTICE  
OF POWER SYSTEMS  
ENGINEERING

電力技術の実用理論  
発電・送変電の基礎理論から  
パワーエレクトロニクス応用まで

第3版



長谷良秀 著

THEORY AND PRACTICE OF POWER SYSTEMS ENGINEERING

# 電力技術の実用理論

発電・送変電の基礎理論から  
パワーエレクトロニクス応用まで

第3版

長谷良秀 著



丸善

丸善出版



# 目 次

第3版まえがき

第2版まえがき

## 序章 電力技術と技術者の使命 1

---

- ◆ 巨大かつ緻密な生きて有機的集合体……………1
- ◆ 新陳代謝による生命維持と成長……………1
- ◆ エネルギー摂取と消費の収支同時・等量性……………2
- ◆ タフさと繊細性を合わせ持つ有機体……………2
- ◆ 能力を超える酷使が招く結果……………3
- ◆ 最高度の精密な技……………3

## 第1章 送電線の回路定数 5

---

- 1・1  $LR$ のみからなる送電線の特性……………5
  - 1・1・1  $LR$ からなる1回線送電線の特性(架空地線なしの場合) 5
  - 1・1・2 架空地線のある1回線送電線の関係式 11
  - 1・1・3  $LR$ のみからなる平行2回線送電線の関係式 12
- 1・2 送電線の漏れキャパシタンス……………13
  - 1・2・1 1回線送電線の漏れキャパシタンス 13
  - 1・2・2 架空地線のある1回線送電線の漏れキャパシタンス 18
  - 1・2・3 平行2回線送電線の漏れキャパシタンス 18
- 1・3 作用インダクタンスと作用キャパシタンス……………19
  - 1・3・1 作用インダクタンスの導入 19
  - 1・3・2 作用キャパシタンスの導入 22
  - 1・3・3 作用インダクタンスおよび作用キャパシタンスの特質 23
  - 1・3・4 MKS有理単位系と電気系の実用単位 24
- 1・4 多導体送電線の等価半径を求める式の導入……………26
  - 1・4・1 インダクタンス計算に関する等価半径 26
  - 1・4・2 キャパシタンス計算に関する等価半径 27

## 第2章 対称座標法 31

---

- 2・1 対称座標法の基本的考え方(変数変換法)……………31
- 2・2 対称座標法の定義……………32
  - 2・2・1 対称座標法の定義 32
  - 2・2・2 対称座標法による変換式の意味 34
- 2・3 3相回路から対称座標法回路への変換……………37
- 2・4 送電線の対称座標法による表示……………38
  - 2・4・1  $LR$ からなる1回線送電線の対称座標法関係式と等価回路 38
  - 2・4・2  $LR$ からなる平行2回線送電線の対称座標法関係式と等価回路 39
  - 2・4・3 1回線送電線の漏れキャパシタンスに関する対称座標法等価回路 42
  - 2・4・4 2回線送電線の漏れキャパシタンスに関する対称座標法等価回路 43
- 2・5 送電線の標準的な回路定数……………45

2・5・1	架空送電線とパワーケーブルの $LCR$ 定数	45
2・5・2	進行波伝搬速度, サージインピーダンスから求める標準的 $L, C$ 値	45
2・6	発電機の対称座標法による表示	49
2・6・1	対称座標法関係式と等価回路の導入	49
2・6・2	発電機等価回路のリアクタンス定数について	51
2・7	3相負荷の対称座標法による表示	51
<b>第3章</b>	<b>対称座標法による故障計算</b>	<b>55</b>
3・1	対称座標法による故障計算の考え方	55
3・2	a相1線地絡故障	56
3・2・1	故障発生前の状況	56
3・2・2	a相故障発生	57
3・2・3	f点仮想端子0-1-2相電圧・電流の計算	57
3・2・4	故障時における任意の地点mの電圧・電流	58
3・2・5	負荷電流がゼロの場合	59
3・3	各種の故障計算	60
3・4	断線故障	60
3・4・1	a相1相断線故障	60
3・4・2	b-c相2線断線	65
<b>第4章</b>	<b>平行2回線の故障計算 (多重故障を含む)</b>	<b>67</b>
4・1	2相回路の対称座標法 (2相回路理論)	67
4・1・1	2相回路対称座標法の定義	67
4・1・2	2相回路の対称座標法変換	69
4・2	並行2回線の対称座標法変換	70
4・2・1	2相回路の変換プロセス	70
4・2・2	並行2回線送電線の変換	72
4・3	平行2回線系統の故障計算 (一般の手順)	73
4・4	平行2回線の片回線故障 (単純事故)	77
4・4・1	1号線a相1線地絡故障	77
4・4・2	その他の故障種類の片回線 (1号線) 単純故障	77
4・5	平行2回線同時故障 (同一地点多重事故)	78
4・5・1	同一地点 (f点) 1号線a相1線地絡・2号線b-c相短絡故障	78
4・5・2	同一地点1号線a相地絡・2号線b相地絡故障 (解法1)	79
4・5・3	同一地点1号線a相地絡・2号線b相地絡故障 (解法2)	80
4・5・4	その他の故障種類の同一地点両回線同時故障	82
4・6	平行2回線異地点同時故障	82
4・6・1	故障地点をf地点およびF地点とする系統回路条件	82
4・6・2	f地点1号線a相地絡・F地点2号線b相地絡故障	83
4・6・3	その他の種類の平行2回線異地点同時故障	84
<b>第5章</b>	<b>PU法の導入と変圧器の取り扱い方</b>	<b>85</b>
5・1	PU法の考え方 (単相回路のPU法)	85
5・1・1	単相回路のPU法	85
5・1・2	単相3巻線変圧器のPU化とその等価回路	86
5・2	3相回路のPU法	90

5・2・1	3相回路のPU法のベース量	90
5・2・2	3相回路関係式のPU化	90
5・3	3相3巻線変圧器の対称座標法関係式と等価回路	91
5・3・1	Y-Y- $\Delta$ 接続3巻線変圧器のPU法等価回路	91
5・3・2	3相変圧器の各種巻線方式対称座標法等価回路	98
5・3・3	変圧器鉄心構造と零相励磁インピーダンスの関係	98
5・3・4	変圧器デルタ巻線	100
5・3・5	高調波電流成分の0-1-2相変換	100
5・4	PU法インピーダンスのベース変換	102
5・5	オートトランス(単巻変圧器)	103
5・6	変圧器の磁気特性と励磁電流突入現象	104
5・6・1	電磁気現象と <i>v-i</i> 回路理論の関係	104
5・6・2	変圧器の磁気特性	105
5・6・3	変圧器の直流偏磁現象	108
5・6・4	励磁電流突入現象とその抑制技術	109
5・7	系統の対称座標法PU等価回路の作成(計算例)	114
<b>第6章 <math>\alpha</math>-<math>\beta</math>-0法とその応用</b>		<b>127</b>
6・1	$\alpha$ - $\beta$ -0法の定義	127
6・2	$\alpha$ - $\beta$ -0法と対称座標法の相互関係と任意波形電気量の表現	129
6・2・1	対称座標法における任意波形電気量の表現	130
6・2・2	$\alpha$ - $\beta$ -0法における任意波形電気量の表現	130
6・2・3	$\alpha$ - $\beta$ -0法と対称座標法の相互関係	131
6・3	$\alpha$ - $\beta$ -0法におけるインピーダンス	133
6・4	3相回路の $\alpha$ - $\beta$ -0法基本式と等価回路	134
6・4・1	1回線送電線	134
6・4・2	平行2回線送電線	134
6・4・3	発電機	136
6・4・4	負荷インピーダンスおよび変圧器インピーダンス	137
6・5	$\alpha$ - $\beta$ -0法による故障計算	138
6・5・1	a相1線地絡の故障計算	138
6・5・2	b, c相2線地絡の故障計算	139
6・5・3	その他の故障モード	141
6・5・4	断線故障	141
6・5・5	$\alpha$ - $\beta$ -0法の評価	141
<b>第7章 対称座標法・<math>\alpha</math>-<math>\beta</math>-0法と過渡現象解析</b>		<b>143</b>
7・1	過渡現象電気量の実数瞬時値表現と複素数瞬時値表現	143
7・2	対称座標法・ $\alpha$ - $\beta$ -0法による過渡現象解析	143
7・3	対称座標法と $\alpha$ - $\beta$ -0法による系統故障時過渡現象計算の比較	146
<b>第8章 中性点接地方式</b>		<b>149</b>
8・1	各種の中性点接地方式とその特徴	149
8・2	1線地絡時の健全相電圧の上昇	151
8・3	消弧リアクトル(ペターゼンコイル)	154
8・4	電圧共振の可能性	154

## 第 9 章 送電線の事故時電圧・電流の図式解法とその傾向 157

- 9・1 3相短絡時の電圧・電流の傾向（直接接地系・高抵抗接地系とも）……………157
- 9・2 b-c相2相短絡時の電圧・電流の傾向（直接接地系・高抵抗接地系とも）……………158
- 9・3 直接接地系 a相1線地絡時の電圧・電流の傾向（線路抵抗，アーク抵抗無視）……………160
- 9・4 直接接地系 b-c相2線地絡時の電圧・電流の傾向（アーク抵抗無視）……………163
- 9・5 高抵抗接地系 a相1線地絡時の電圧・電流の傾向（アーク抵抗考慮）……………165
- 9・6 高抵抗接地系 b-c相2線地絡時の電圧・電流の傾向（アーク抵抗無視）……………167

## 第 10 章 発電機の理論 171

- 10・1 発電機の a-b-c 相電気量によるモデリング……………171
  - 10・1・1 発電機の基本回路 171
  - 10・1・2 発電機の a-b-c 相基本関係式の導入 173
  - 10・1・3 a-b-c 相基本式中のインダクタンスの性質 175
- 10・2 d-q-0 法の導入……………179
  - 10・2・1 d-q-0 法の定義 179
  - 10・2・2 d-q-0 領域と a-b-c 領域，0-1-2 領域の相互関係 180
  - 10・2・3 d-q-0 領域電気量の特徴 181
- 10・3 d-q-0 領域への変換……………183
  - 10・3・1 発電機 a-b-c 相関係式の d-q-0 法変換 183
  - 10・3・2 d-q-0 領域上で発電機基本式の意味するもの 186
  - 10・3・3 発電機 d-q-0 基本式の PU 化 189
  - 10・3・4 d-q-0 法等価回路の導入 193
- 10・4 発電機の定常運転時の d-q-0 領域上のベクトル図（正相定常状態）……………195
- 10・5 発電機の過渡現象と d 軸，q 軸各種リアクタンス……………198
  - 10・5・1 急変発生直前の初期条件 198
  - 10・5・2 系統急変直後の過渡現象状態における d 軸，q 軸リアクタンス 199
- 10・6 発電機急変後の初期過渡・過渡・定常時の対称分等価回路……………200
  - 10・6・1 正相等価回路 200
  - 10・6・2 逆相等価回路 203
  - 10・6・3 零相等価回路 204
- 10・7 発電機の基本式のラプラス変換と発電機の各種時定数……………205
  - 10・7・1 ラプラス形式によるステータ電圧・電流の基本式 205
  - 10・7・2 発電機の開路時定数 206
  - 10・7・3 発電機の短絡時定数 206
  - 10・7・4 発電機の電機子時定数 208
- 10・8 各種リアクタンスの測定法……………209
  - 10・8・1 d-軸同期リアクタンスの測定法と短絡比 209
  - 10・8・2 逆相リアクタンスと零相リアクタンスの測定 211
- 10・9 d-q-0 領域電気量と  $\alpha$ - $\beta$ -0 領域電気量の関係……………213
- 10・10 発電機の短絡時の過渡現象計算……………213
  - 10・10・1 有負荷時3相突発短絡 213
  - 10・10・2 無負荷時3相突発端短絡 217
- 10・11 鎖交磁束および漏れ磁束の概念……………217

<b>第 11 章 皮相電力と対称座標法・d-q-0 法</b>	<b>225</b>
11・1 任意波形電圧・電流に対する皮相電力とその記号法表示	225
11・1・1 皮相電力の定義	225
11・1・2 一般波形への拡張	226
11・2 対称座標法による皮相電力	227
11・3 d-q-0 法による皮相電力	229
<b>第 12 章 発電機の発生電力と定態安定度 (Park 理論の電力への拡張)</b>	<b>233</b>
12・1 発電機の発生電力と $P$ - $\delta$ 曲線・ $Q$ - $\delta$ 曲線	233
12・2 発電機から系統への皮相電力送電限界 (定態安定度)	236
12・2・1 1 機無限大母線系統と 2 機系統の等価性	236
12・2・2 発電機の皮相電力 ( $P$ - $\delta$ 曲線と $Q$ - $\delta$ 曲線)	237
12・2・3 発電機の送出可能な最大皮相電力 (定態安定度限界)	238
12・2・4 発電機の最大皮相電力の可視化	238
12・2・5 定態安定度の機械モデル	240
<b>第 13 章 電気機械としての発電機</b>	<b>243</b>
13・1 発電機の機械入力と発生電力	243
13・1・1 機械入力と電気出力の関係	243
13・2 発電機の運動方程式	245
13・2・1 発電機の力学的特性 (機械的運動方程式)	245
13・2・2 発電機の運動方程式 (電気的表現)	247
13・3 機械入力から電気出力へのパワー伝達のメカニズム	247
13・4 発電機の回転速度調整: スピードガバナ	252
<b>第 14 章 系統の <math>P</math>-<math>Q</math>-<math>V</math> 特性と過渡・動態安定度および電圧安定度</b>	<b>257</b>
14・1 定態・過渡・動態安定度の概念	257
14・2 2 機系統の動揺方程式と外乱による応動	258
14・3 過渡安定度と動態安定度ケーススタディ	259
14・3・1 過渡安定度	259
14・3・2 動態安定度	260
14・4 4 端子回路の皮相電力と発電機からみる特性インピーダンス	261
14・4・1 特性インピーダンス	261
14・4・2 事故時の送電可能電力 ( $P$ - $\delta$ 曲線のピーク値) の試算	263
14・5 系統全系の $P$ - $Q$ - $V$ 特性と電圧安定度 (電圧不安定現象)	264
14・5・1 送受両端の皮相電力	264
14・5・2 $P$ , $Q$ の微小変化 $\Delta P$ , $\Delta Q$ に対する電圧感度	265
14・5・3 電力円線図	265
14・5・4 $P$ - $Q$ - $V$ 特性と $P$ - $V$ 曲線, $Q$ - $V$ 曲線	266
14・5・5 系統・負荷の $P$ - $Q$ - $V$ 特性と電圧不安定現象	268
14・5・6 $V$ - $Q$ 制御 (電圧・無効電力制御)	270
<b>第 15 章 AVR を含む発電機系と負荷の全体応動特性</b>	<b>275</b>
15・1 AVR の理論と発電機系伝達関数	275

15・1・1 発電機固有の伝達関数 275  
 15・1・2 「発電機+負荷」の伝達関数 277  
 15・2 AVR系を含めた発電機全体系の伝達関数と応動特性 .....279  
 15・3 「発電機+励磁器+AVR+負荷」全系の応動特性と運転限界 .....281  
   15・3・1 「発電機+励磁器+AVR+負荷」全系の  $s$  関数式の導入 281  
   15・3・2 運転限界とその  $p$ - $q$  座標表示 284  
 15・4 線路充電運転の安定限界と AVR .....285

**第 16 章 発電機の運転とその運転性能限界** 289

16・1 発電機運転状態の一般式導入 .....289  
 16・2 発電機の定格事項と能力曲線 .....291  
   16・2・1 定格事項と能力曲線 291  
   16・2・2 各種運転条件での軌跡 294  
 16・3 発電機進相率（低励磁領域）運転の問題と UEL 機能 .....296  
   16・3・1 発電機の無効電力発生源としての役割 296  
   16・3・2 発電機の進相運転（低励磁運転）による固定子鉄心端部の過熱問題 297  
   16・3・3 AVRによる UEL 保護 300  
   16・3・4 過励磁領域の運転 301  
 16・4 AVRによる発電機の電圧・無効電力（ $V$ - $Q$ ）制御 .....301  
   16・4・1 発電機並列運転時の無効電力の配分と横流補償 301  
   16・4・2  $P$ - $f$  制御と  $V$ - $Q$  制御 303  
 16・5 発電機の苦手現象（逆相電流・高調波電流・軸ねじれ） .....304  
   16・5・1 発電機の体格と定格容量の関係 304  
   16・5・2 逆相電流によるロータの異常過熱現象 305  
   16・5・3 発電機の逆相電流耐量 305  
   16・5・4 高調波・直流電流による異常過熱現象 307  
   16・5・5 過渡トルクによるタービン発電機の軸ねじれ現象 309  
 16・6 火力・原子力発電機の新鋭機の動向 .....313  
   16・6・1 蒸気火力のボイラー・タービン系 313  
   16・6・2 コンバインドサイクル機（ガスタービン/蒸気タービン複合型火力） 315  
   16・6・3 原子力発電所用蒸気タービン（ST） 317

**第 17 章  $R$ - $X$  座標と方向距離継電器（DZリレー）の理論** 321

17・1 保護リレーの使命と分類 .....321  
 17・2 方向距離リレーの原理と  $R$ - $X$  座標 .....322  
   17・2・1 方向距離リレー（DZ-Ry）の基本的機能 322  
   17・2・2  $R$ - $X$  座標と  $P$ - $Q$  座標および  $p$ - $q$  座標の関係 322  
   17・2・3 距離リレーの動作特性 323  
 17・3 無負荷事故時のインピーダンス軌跡 .....324  
   17・3・1 b-c 相 2 線短絡時の方向短絡距離リレー（44 S-1, 2, 3）の応動 324  
   17・3・2 a 相 1 線地絡時の方向地絡距離リレー（44 G-1, 2, 3）の応動 327  
   17・3・3 b-c 相 2 線短絡時の方向地絡距離リレー（44 G-1, 2, 3）の応動 329  
 17・4 平常時と脱調時のインピーダンス軌跡 .....330  
   17・4・1 平常時・動揺時のインピーダンス軌跡 330  
   17・4・2 方向距離リレーによる脱調検出とトリップ阻止 333  
 17・5 有負荷事故時のインピーダンス軌跡 .....334

17・6 発電機の界磁喪失リレー .....	335
17・6・1 界磁喪失リレーの特性	335

## 第18章 進行波の現象 341

18・1 送電線（分布定数回路）の進行波理論 .....	341
18・1・1 送電線（架空送電線・ケーブル）の波動方程式と進行波のイメージ	341
18・1・2 ラプラス変換領域における電圧・電流の一般解	346
18・1・3 任意の2点間の4端子回路行列式	347
18・1・4 定数の吟味	349
18・2 分布定数回路の近似化と集中定数回路の精度 .....	350
18・3 進行波の透過と反射 .....	351
18・3・1 変移点における透過と反射の一般式	351
18・3・2 電圧・電流侵入波の変移点における様相	352
18・4 サージ過電圧，紛らわしい三つの表記法 .....	354
18・5 雷直撃地点に発生する進行波 .....	356
18・6 3相送電線のサージインピーダンスと落雷現象 .....	357
18・6・1 3相送電線のサージインピーダンス	357
18・6・2 対称座標法によるサージ解析（a相への雷撃の場合）	358
18・7 3相回路の対地波と線間波（対地波・線間波変換法） .....	359
18・8 格子図法によるサージ解析および過渡現象のモード .....	361
18・8・1 格子図法	361
18・8・2 サージ波の振動性と非振動性	363

## 第19章 開閉（遮断・投入）現象 367

19・1 単相回路の遮断過渡現象の計算 .....	367
19・1・1 短絡電流遮断時の過渡電圧計算	367
19・1・2 左右に電源系統がある場合の回路遮断の過渡電圧計算	370
19・2 3相回路の遮断過渡現象の計算 .....	375
19・2・1 遮断第1相の回復電圧	375
19・2・2 第1・2・3相遮断計算（3相短絡の場合）	377
19・3 遮断器の概念 .....	383
19・3・1 遮断器の概念	383
19・3・2 遮断性能や開閉現象に関する主な用語	385
19・4 実際の遮断現象 .....	386
19・4・1 短絡電流（遅相電流）遮断	386
19・4・2 進み小電流（線路の充電電流）遮断	386
19・4・3 近距離故障遮断（SLF）	390
19・4・4 遅れ小電流遮断・励磁突入電流遮断時のチョッピング現象	392
19・4・5 脱調遮断	394
19・4・6 電流ゼロミス現象	394
19・5 遮断器投入時の過電圧現象（投入サージ） .....	395
19・5・1 遮断器投入による過電圧現象	395
19・5・2 投入サージの試算	396
19・6 遮断器の抵抗遮断方式と抵抗投入方式 .....	397
19・6・1 抵抗遮断方式と抵抗投入方式の原理	397
19・6・2 抵抗遮断方式と抵抗投入方式の採用選択	398



19・6・3	抵抗遮断方式遮断器による遮断現象	398
19・6・4	投入時の現象（抵抗投入方式）	401
19・7	断路器の開閉サージ	402
19・7・1	断路器サージ現象	403
19・7・2	断路器サージの影響	404

## 第20章 過電圧現象 409

20・1	過電圧現象の分類	409
20・2	持続性・短時間過電圧現象（非共振性 AC 過電圧）	410
20・2・1	フェランティ効果	410
20・2・2	発電機の自己励磁	411
20・2・3	負荷遮断	412
20・2・4	1線地絡時健全相電圧上昇	413
20・3	持続性・短時間過電圧現象（共振性過電圧）	413
20・3・1	比較的広範囲な系統の共振現象（低周波線形共振）	413
20・3・2	局所的な共振現象（高周波領域の線形共振，鉄心飽和による非直線共振など）	415
20・3・3	中性点非接地（あるいは微小接地方式）系のケーブル間欠地絡	416
20・4	開閉過電圧現象（開閉サージ）	417
20・4・1	遮断器投入時（投入サージ）	417
20・4・2	遮断器の遮断時（遮断サージ）	417
20・4・3	断路器の開閉サージ	418
20・5	雷過電圧現象	418
20・5・1	直撃雷	418
20・5・2	架空地線・鉄塔への直撃雷（逆せん絡，逆フラッシュオーバ）	419
20・5・3	誘導雷（静電誘導雷・電磁誘導雷）	420

## 第21章 絶縁協調 425

21・1	絶縁に対するストレスとしての過電圧	425
21・1・1	導電と絶縁	425
21・1・2	過電圧の分類	426
21・2	絶縁協調の基本概念	430
21・2・1	絶縁協調の概念	430
21・2・2	絶縁強度とブレイクダウンに関する基本原則	431
21・3	架空送電線の過電圧抑制策と防護策	432
21・3・1	架空地線（OGW，OPGW）の採用	433
21・3・2	3相導体・地線の適切なクリアランスと配置の確保	433
21・3・3	鉄塔のサージインピーダンス低減	433
21・3・4	アークホーンの採用	434
21・3・5	送電線用避雷装置	434
21・3・6	不平衡絶縁の採用（並行2回線送電線の場合）	436
21・3・7	高速度再閉路方式の採用	436
21・4	発電所における過電圧保護	437
21・4・1	避雷器によるサージ過電圧保護	437
21・4・2	酸化亜鉛型避雷器	439
21・4・3	避雷器の定格と選定区分	443
21・4・4	避雷器の離隔効果の問題	445
21・4・5	変電所の架空地線 OGW と接地抵抗低減による防護	447

21・5 絶縁強調 .....	449
21・5・1 絶縁強調の規格に関する定義とその基本的コンセプト	449
21・5・2 絶縁構成	450
21・5・3 絶縁耐電圧レベルと BIL, BSL の定義	451
21・5・4 標準耐電圧値 (IEC, IEEE の場合)	452
21・5・5 JEC 規格の耐電圧値	457
21・5・6 ケーブルの絶縁保護	461
21・6 変圧器の移行電圧現象と発電機保護 .....	462
21・6・1 静電移行サージ過電圧	462
21・6・2 静電移行電圧の防護対策	468
21・6・3 変圧器の電磁移行電圧	469
21・7 サージによる変圧器巻線の電圧振動 .....	469
21・7・1 変圧器のサージ現象に対する等価回路	469
21・7・2 サージ侵入による変圧器内部の振動性過渡電圧とその計算	471
21・7・3 変圧器内部のサージ性電圧振動の抑制	474
21・8 油変圧器とガス変圧器 .....	475
<b>第 22 章 波形ひずみ (低次高調波) 現象</b> .....	<b>477</b>
22・1 波形ひずみ (低次高調波) 現象の発生要因と影響 .....	477
22・1・1 発生要因の分類	477
22・1・2 波形ひずみの発生	479
22・2 事故時のケーブル系波形ひずみ現象 .....	480
22・2・1 波形ひずみの発生メカニズムとその計算	480
22・2・2 電流ひずみ成分 (式(22・10) の過渡成分) の吟味	483
22・2・3 電圧・電流波形ひずみの保護リレーなどへの影響	485
<b>第 23 章 電力ケーブル線路</b> .....	<b>487</b>
23・1 CV ケーブルと OF ケーブル .....	487
23・1・1 電力用ケーブルの種類	487
23・2 電力ケーブルの特徴 .....	491
23・2・1 絶縁方式	491
23・2・2 製造プロセス	492
23・2・3 さまざまな布設環境と求められる耐環境性	492
23・2・4 電力ケーブルの許容電流	494
23・2・5 ケーブルの絶縁に関する諸元と試験電圧値	494
23・3 ケーブルの電気回路定数 .....	497
23・3・1 ケーブルのインダクタンス	497
23・3・2 ケーブルのキャパシタンスおよびサージインピーダンス	501
23・4 金属シースと防食層 .....	503
23・4・1 金属シースと防食層の役割	503
23・4・2 シースの両端接地方式と片端接地方式	504
23・5 クロスボンド接続方式 .....	505
23・5・1 クロスボンド接続方式	505
23・5・2 クロスボンド接続方式のサージ現象とその防護策	505
23・5・3 クロスボンド接続単心 3 相ケーブル線路のシース異常電圧対策	507
23・6 ケーブル接続終端における導体・シースのサージ性異常電圧 .....	508
23・6・1 架空送電線とケーブル接続点のサージ現象	508

23・6・2	サージ過電圧のケーブル区間伝搬	509
23・6・3	金属シースの両端接地と片端接地の選択と対策	511
23・7	架空送電線とケーブルの接続系統のサージ過電圧	512
23・8	開閉サージのケーブル線路への襲来	513
23・9	GIS・ケーブル接続終端のサージ性異常シース電位	514

## 第 24 章 特別な回路の場合 517

24・1	負荷時タップ切換変圧器	517
24・2	位相調整変圧器（移相変圧器）	519
24・2・1	基本式の導入	519
24・2・2	ループ系統への適用	521
24・3	ウッドブリッジ変圧器とスコット変圧器	522
24・3・1	ウッドブリッジ変圧器	522
24・3・2	スコット変圧器	524
24・4	零相接地変圧器	525
24・5	相順の誤接続回路の計算	526
24・5・1	ケース 1 a-b-c 相 $\Leftrightarrow$ a-c-b 相の誤接続の場合	527
24・5・2	ケース 2 a-b-c 相 $\Leftrightarrow$ b-c-a 相の誤接続の場合	529

## 第 25 章 誘導機の理論 531

25・1	誘導機（誘導発電電動機，誘導発電機，誘導電動機）	531
25・2	3相巻線形誘導機の理論	532
25・2・1	誘導機の abc 領域における基本式	533
25・2・2	abc 領域から dq0 領域への変換	536
25・2・3	dq0 領域変換式のフェーザ表現	544
25・2・4	誘導機の駆動力とトルク	545
25・2・5	誘導機の定常運転	548
25・3	かご型誘導機	550
25・3・1	回路方程式	550
25・3・2	かご形誘導機の特性	552
25・3・3	PE 制御の基礎としての誘導機のトルク・速度・パワー	555
25・3・4	停止状態からの起動時運転	560
25・3・5	定常運転	561
25・3・6	誘導機の加速運転とブレーキ運転	561

## 第 26 章 パワーエレクトロニクス用スイッチング素子の概念 565

26・1	パワーエレクトロニクスの基本概念	565
26・2	電力素子によるパワースwitching	566
26・3	スナバー回路	569
26・4	スイッチングによる電圧変換	571
26・5	パワーエレクトロニクス素子	573
26・5・1	パワー素子の分類とその基本特性	573
26・5・2	ダイオード	573
26・5・3	サイリスタ	574
26・5・4	GTO	575
26・5・5	バイポーラジャンクショントランジスタ	576

26・5・6	パワー MOSFET	577
26・5・7	IGBT	578
26・5・8	IPM	579
26・6	パワーエレクトロニクスに登場する数学的基礎	579
26・6・1	フーリエ級数展開	579
26・6・2	任意波形の電気量（ひずみ波交流）の平均値と実効値	580
26・6・3	パワー・力率・歪率	580
26・6・4	直流量の繰り返しオン・オフスイッチング	580
26・6・5	交流長方形波	581
26・6・6	点弧角 $\alpha$ ・消弧角 $\beta$ の長方形波	582
26・6・7	ひずみ波電圧・電流の電力	583

## 第 27 章 パワーエレクトロニクス変換回路の理論

585

27・1	交流から直流への変換：ダイオードによる整流器	585
27・1・1	単相半波整流回路（純抵抗負荷の場合）	585
27・1・2	誘導性負荷の場合および直列インダクタンスの役割	586
27・1・3	還流ダイオードと平滑リアクトルの役割	588
27・1・4	ダイオードブリッジ単相全波整流回路	589
27・1・5	電圧平滑キャパシタの役割	590
27・1・6	3相半波整流回路	591
27・1・7	電流の重なり現象	592
27・1・8	3相全波整流器	593
27・2	サイリスタによる交流直流制御変換	594
27・2・1	サイリスタ単相半波ブリッジ型整流回路	594
27・2・2	サイリスタ単相全波型整流回路	596
27・2・3	サイリスタによる3相全波整流回路	599
27・2・4	高調波成分とひずみ率	601
27・2・5	転流リアクタンス（電源側リアクタンス）の影響	602
27・3	dc-dc コンバータ	603
27・3・1	直流降圧用 dc-dc コンバータ	603
27・3・2	昇圧コンバータ	605
27・3・3	昇降圧コンバータ	606
27・3・4	2象限/4象限コンバータ（複合コンバータ）	608
27・3・5	dc-dc コンバータのパルス幅変調（PWM）制御	609
27・3・6	多相コンバータ	610
27・4	dc-ac インバータ	610
27・4・1	インバータの概要	610
27・4・2	単相インバータ	611
27・4・3	3相インバータ	614
27・5	インバータの PWM 制御	616
27・5・1	PWM 制御の原理（三角波変調の場合）	616
27・5・2	許容誤差バンド PWM 制御	619
27・6	サイクロコンバータ	620

## 第 28 章 発電・送変電および受配電システムにおけるパワーエレクトロニクスの応用

625

28・1	パワーエレクトロニクスの応用	625
28・2	モータ駆動応用	626

28・2・1	誘導電動機駆動制御	626
28・2・2	V/F 制御	628
28・2・3	一定トルク一定速度制御	630
28・2・4	誘導電動機の瞬時空間ベクトル制御	631
28・2・5	回転磁界を得る空間ベクトル制御	634
28・2・6	d-q 変換 PWM 正弦波制御	635
28・3	発電機励磁システム	636
28・4	可変速揚水発電電動機システム	638
28・5	風力発電	642
28・5・1	風力発電システム	642
28・5・2	風力用発電機	646
28・5・3	風力発電用変電所	646
28・6	小水力発電	647
28・7	太陽光発電	648
28・7・1	ソーラエネルギーと PV 太陽光発電方式	648
28・7・2	起動時の問題	651
28・8	静止型無効電力補償器（他励方式）	652
28・8・1	SVC	652
28・8・2	TCR	654
28・8・3	交直変換回路による無効電力補償装置	655
28・8・4	非対称 PWM 制御とその SVC への応用	656
28・8・5	SVG あるいは STATCOM	657
28・9	電力用アクティブフィルタ	660
28・9・1	電力用アクティブフィルタの基本原理	660
28・9・2	アクティブフィルタの d-q 法制御	662
28・9・3	SVG の d-q 法空間ベクトル PWM 制御	664
28・9・4	直流インバータの d-q 変換法制御	664
28・9・5	電力用アクティブフィルタ（p-q 座標法）	666
28・10	直流送電（HVDC 送電）	666
28・11	電力無効制御（FACTS）	670
28・11・1	FACTS の概要	670
28・11・2	直列キャパシタ TCSC および TPSC	672
28・11・3	直列キャパシタ補償に伴う発電機の超低周波共振現象	673
28・12	鉄道における PE 応用	673
28・12・1	鉄道用変電設備での応用	673
28・12・2	鉄道車載用モータ駆動システム	674
28・13	無停電電源（UPS）	677
付録 1.	数 学 公 式	681
付録 2.	回路方程式の行列記法	685
分類別解説個所一覧		689

休憩室

1. 電気の夜明け：先駆的役割を果たした 19 世紀前半の大科学者たち 28
2. Faraday と Henry, 電気エネルギー利用への道を開いた巨人 53

3. Weber と他の開拓者たち 65
4. Maxwell, 19 世紀で最も偉大な科学者 121
5. Hertz による電波の発見と現代の始まり 155
6. 実用工学の輝かしい夜明け：1885-1900 年代 169
7. 電気工学の巨人 Heaviside 221
8. 複素記号法の誕生と創始者 Arthur Kennelly 255
9. 電気・電力工学の大先駆者 Steinmetz 271
10. 電力技術理論：初期の先駆者の人々 287
11. 対称座標法, その生みの親・Fortescue と育ての親・別宮貞俊 319
12.  $\alpha$ - $\beta$ -0 法 (Clarke Components) の登場 339
13. d-q-0 法の登場 406
14. アメリカ, 電気事業・電気メーカー誕生のころ 422
15. 雷撃解析, そして絶縁強調 564
16. 日本, 電気事業・電気メーカー誕生のころ 622
17. 電化社会 100 年の今 678

## 第3版 まえがき

本書は『電力技術の実用理論 第2版』(2011年, 初版は2004年に刊行)にパワーエレクトロニクス(PE: Power Electronics)関連の第25-28章を新たに書き下ろして加え, 既存の第1-24章にも若干の増補を行ったものです。またほぼ同じ内容の書籍『Handbook of Power System Engineering with Power Electronics; Second edition』がWileyより2012年12月に出版されています。

丸善出版の第2版およびWileyの初版『Handbook of Power System Engineering』(2007年)は幸いにも国内外で好評を得ることができました。ただ筆者としては“裾野の広い電力技術を多角的・統合的に描くダイナミックな実用書”を意図しながらも, 電力システムや電動応用のあらゆる分野で重要な役割を果たしているPE应用に関する解説が旧版では欠落していることを一つの課題としていました。幸いにもWileyから同様の指摘とともに第2版出版の勧めをいただいたので, PE应用技術を軸に加筆を行って, 2012年に出版したのがWileyの第2版です。そして今回, 丸善出版よりほぼ同じ内容の日本語版として本書を出版させていただくことになりました。

新規の章は第25章(誘導機の理論), 第26章(PE用スイッチング素子の概念), 第27章(PE変換回路の理論), 第28章(発電・送変電および受配電システムにおけるPE应用)の約150ページで構成し, また第1~24章で20ページほどを増補しています。第25章では誘導機の特性について筆者なりに徹底解説を試みました。誘導機は電力および電動力利用のあらゆる応用分野で(多くの場合PEと組み合わせる)多用される代表的な回転機ですが, その特性を詳細に論ずる専門書はほとんど見当たりません。またPEの専門書ではほとんどの場合, 誘導機のトルク・スピード・周波数特性曲線などが, その理論的根拠が示されることなく突然登場します。そこで筆者としては, 実用技術の基礎となる基本理論を重視する本書のこだわりがありますので, 第25章で誘導機の詳細理論を試みたものであります。参考になる本が皆無に近い状態で筆者として執筆に最も苦心した章でもあり, 第10章の同期機理論と合わせて読者の皆様のご批評をいただきたい章でもあります。

次に第26~28章の執筆にあたっては国内外のいくつかの本を参考にしました。その中で一つの発見は“PE専門書群には標準的な目次構成のようなイメージがなくて, 個々の本の目次は夫々の著者の考えによって非常に異なっている”ということでした。PE技術は i) PE素子物理, ii) PE素子, iii) PE回路, iv) PE制御理論, v) 被制御系理論(電力システムの理論・電動力応用の理論)の5層構造からなっていると表現できそうです。その間口も奥行きも非常に広く大きいので, 個々の著作ごとに採り上げられる内容に大きな差異が生ずるのは当然のことでもあるでしょう。

そこで本書では, 電力システム・電動力応用システムの理論(v層: 被制御系理論)は第1-25章で詳述しているという前提に立って, 第26~28章はPE应用編として(筆者の手に負えないi層は除外して)ii, iii, iv層に力点を置きつつ, 対象システムごとの理論を適宜加えて執筆した次第です。

本書が電力システム・電動力応用システム分野の実践的業務で活躍される技術者諸氏やそれを目指す学生諸君のお役に立てば幸いです。

最後に, 旧版に続き第3版出版の機会をいただいた丸善出版に感謝の意を表します。

2014年12月

長谷良秀





## 第2版 まえがき

本書は電力会社、電機メーカー、エンジニアリング会社などで電力技術に携わる技術者の皆さんと、それを目指す学生の皆さんに読んでいただくことを想定して“電力技術の実践的な基礎理論”についてまとめたものです。発電・流通・負荷の各部門を通じて、いわゆる“電力技術”は細かく枝分かれして個々の専門に分化していますが、技術者の皆さんが、自身の従事されている専門分野との関係にこだわることなく本書のカバーする電力技術理論を共通ベース知識として学んでいただければ個々の専門技術力をいっそう高めていただくうえでもお役に立つのではないかと考えています。

本書では次のような点に心掛けました。

第一は、電力システムの姿をさまざまな視点からできるだけ多角的・統合的に描くように努めました。本書で扱う電力システムとは“広義の電力システム”，すなわち“発電・送変電・配電・負荷を包括した統合された電力システム”を意味しています。

電力システムは文字どおり全国いたるところを隅々まで銅線で統合的につないだ超巨大システムであり、多様な構成メンバーが無数につながれたシステムです。また銅線でつながる主回路系だけでなく、情報ネットワーク系などが同じ広がりでも覆いかぶさっている多層構造のシステムでもあります。その多様性はさまざまな対極的な言葉、例えば、全系：ローカル系、発電：送変電、線路：送変電機器、主回路系・制御系：保護系：通信系：計算機系、高圧系：低圧制御系、商用周波数：過渡：サージ、システム：コンポ、ハード：ソフト…、等々をすべて包含することでも説明できるでしょう。対象システムの巨大さゆえに電力技術がさまざまな専門に分化していくのは当然です。また複雑に枝分かれした個々の専門技術理論等はダイナミックな電力システムの多角的な姿の一部・一断面・一観察視点ということになるでしょう。さて、個々の専門分野・専門技術が並列的に存在することになりますが、それらがあたかも相互に無関係な孤立した専門として固定化してしまう傾向が見られます。個々の技術者の立場からいえば、ダイナミックな多次元の電力システムを対象にして、次元が一つないし二つ低い固定された自分の窓からのみ観察し、アクセスしている関係にあるといえなくもありません。これでは卵を白い円形ないし楕円形と見誤ることがないと言い切れません。“電力技術者は電力システムの全体像をなるべく多角的視点に立って接することによってこそより高度で柔軟な専門性を養うことができる”というのが筆者の持論です。本書の執筆にあたって筆者が第一に意図した点です。全24章を読み進めていただければ筆者の意図がご理解いただけるかと思えます。

第二のポイントは、理論式を組み立て、その解を導いて結論に達する過程を詳しく追うことで電力システムの姿（特性・応動）を理論的に理解することに徹しました。技術活動に携わるなかで“なぜだろう？”と思うことがしばしばあります。目の前にある見慣れた現象とか仕事上のルールや活用法を知っていながらその理由を知らないという場合などです。理由を知らないまま結果だけを便利に利用しているという事例が身近なところに結構多いのではないのでしょうか。技術者が“なぜか”を知らなくても日常の大方の業務はこなせるでしょうが、ひとたび状況が変われば臨機応変の正しい対応は難しいでしょう。それでは本物の技術とはいえません。本書では電力システムのさまざまな物理的事象を理解する手法として、その理論式を導入し、展開し、結論を導くまでの過程を丁寧に追うことに努めました。理論式の展開過程では途中の省略とか結論のみの提示にとどめるなどの

曖昧さを絶対に残さないことを鉄則としましたので、丁寧に読み進んでいただければ必ず理解いただけると思います。随所に独創的な説明を工夫しつつ電力技術をいろいろの角度からわかりやすく理解していただくことに努めたつもりです。読者の皆さんには現象を理論式で理解することで技術力に自信をつけていただけるのではないかと考えております。

第三には難しい理論展開が実は役に立つ身近な道具であると読者に実感いただけるように工夫をこらしたつもりです。例えば、複雑な理論式展開の後に実践技術に近い具体的な数値を使った“試算”を多くの章節で示しました。理論展開の結果をより身近な事象として理解していただくための工夫です。またもう一つ例をあげれば、わずかに三つか四つの回路定数  $L, C, R$  が直並列につながれたごく簡単な回路ですら（過渡現象解析理論を完全にマスターしている人によっても）特別の場合を除き複雑すぎてその過渡現象の方程式解を求めることができません。したがって、過渡現象解析の専門書には特別の場合の解しか示してありません。しかしながらわれわれ技術者は職場の実務でぶつかるどのような問題に対しても解を得ずに途中で放り出すことはできません。上述の例ではわれわれは回路定数の大小関係を知っていますから、適切な近似化作業で実用上十分な精度の高い解を得ることができます。このようなテクニックを学びながら、どのような問題にも筆算的に対応できる基礎的な実務技術を習得できることにも努めたつもりです。

第四はシンプルな系統モデルで生ずる現象を徹底理解することに努めました。近年ではパソコン級の計算機によっても大系統の応動解析や複雑な機器回路のシミュレーションなどが比較的簡単にできるようになりました。所定の数値をいくつか入力すればブラックボックスが答えを出してくれる時代です。しかしながら、関連因子が多い解析の答えが正しいものであると判断できるかどうか。この場合、頼れるのは技術者の深い知見に裏付けされた感性と洞察力のみです。本書では発電機がせいぜい1~2台、送電線路が1~数回線というような単純な系統を対象にしてさまざまな現象の説明を進めますが、このように単純な基本系統における現象をしっかり理解することこそが巨大なシステムの応動を正しく理解するのに絶対欠かせないと考えます。

筆者は2004年に丸善より「電力系統技術の実用理論ハンドブック」を出版し、また2007年にはWiley社より「Handbook of Power System Engineering」を出版し、光栄にも両書に対して二度の電気学会著作賞をいただくことができました。Wiley版は丸善版を大幅増補した内容ですが海外にも類書が全くないことから望外の好評をいただくことができました。そして本書は筆者にとっては前二冊の好評に勇気づけられたうえでの、大幅増補改訂版です。特に第10章以降の発電・送変電の理論と実用技術の徹底解説で質・量ともに全面的に刷新・充実を図りました。本書が電力技術に携わる技術者の皆様の実践業務のお役に立てば幸いです。

本書を出版するに当たり貴重な資料・写真等を提供いただいた東京電力・中部電力・東芝・エクシム並びにGE各社にあらためて御礼申し上げます。また執筆にあたってご支援をいただきました多くの方々に対してお名前を伏したままですが衷心より御礼を申し上げます。

最後に二度にわたり出版の機会をいただいた丸善出版（株）と、またその中心となってあらゆるご支援をいただいた同社池田和博氏に深く感謝の意を表する次第です。

2011年4月

長谷良秀