

制御方式入門

改訂第三版

重野誉敬 著

本書は電気車の各種制御方式に関し、基本的な原理から実際の主回路までを可能な限り楽しく、そして解り易く解説した本です。本書を通して電気車の制御方式に少しでも興味を持っていただければ幸いです。

Introduction to Train Traction System
Third Edition

はじめに

本書は電気車の各種制御方式の基本的な原理に関し可能な限り楽しく、そして解り易く解説した本です。楽しく読んでいただくという事に主眼を置いて書かれていますので、内容的にはやや厳密さを欠く箇所があるという事をご了承下さい。この本を通して制御方式に少しでも興味を持っていただければ幸いです。

説明に際しては極力実際の車両の主回路を例示し、具体的に説明するようにしてあります。また、国内で用いられているまたは過去に用いられた制御方式を中心に解説しているため、海外では普及しているものの国内では用いられない制御方式に関しては基本的に説明しておりません。

本書の構成と読み方

本書は11の章から構成されています。

これらのうち第1章から第3章までは基礎的な事柄に関し説明しています。第1章は「電気車の基礎」として電気車及び電気鉄道に関し極めて基本的な事柄を説明しています。第2章では制御方式の進歩、歴史を具体的な車両・系列を挙げつつ紹介し、章の最後では制御方式の特徴を横断的に纏めています。第3章では制御方式の理解に当たって必要な基礎的な物理、数学及び電気の法則を説明しています。これらの章に関しては必要に応じ適宜御覧になる事をお勧めします。

第4章から第6章までは直流機の制御方式に関し説明します。第4章では直流機の原理及び特性を説明します。第5章では直流機の制御方式のうち抵抗制御及びその発展型に関し説明します。第6章では直流機の制御方式のうち主回路チョップ制御に関し説明します。

第7章では、電気車の神経にあたる制御回路に関し、その概念及び実際の動作を説明します。また、最新の車両情報システムについても触れています。

第8章と第9章では現在主流となっているVVVFインバータ制御に関し説明します。第8章ではVVVFインバータ制御で用いられる誘導電動機に関しその原理及び特性を説明します。第9章ではインバータ及びその制御、VVVFインバータの付加機能に関し説明します。

第10章では交流電気車特有の制御方式であるタップ制御、位相制御及びPWMコンバータについて説明するとともに、新交通システム及び交直流電気車に関し紹介します。

最終章となる第11章では、制御方式に関する近年の技術開発の動向と、現在開発中の制御方式について紹介します。

各章の末尾、及び巻末には参考文献リストを掲載しており、巻末には索引も設けています。当然ではありますが本書は存在する制御方式の全てを説明しているという訳ではありません。制御方式に関し更なる理解を深めるためにはこれらの参考文献を紐解いてみる事をお勧めします。また、索引を充実させておりますので必要に応じて御利用ください。

おことわり

本書の内容は個人的に調査したものであり、本書に登場する関係各機関等はこの内容に関し一切関知しておりません。本書の内容に関し電気品メーカー、鉄道会社等現業機関への問い合わせ等は厳にお控え下さいますようお願いするとともに、著者はその結果に関して一切の責任を負わない旨予めご了承願います。

尚、筆者の浅学無知により事実誤認、誤り、解り難い箇所等ございましたら、ご指摘頂ければ幸いです。

目次

第1章	電気車の基礎	007
1.1	電気鉄道と電気車	008
1.2	電気方式	008
1.3	制御の必要性	010
1.4	制御方式に求められる要件	010
1.5	制御方式の種類	011
1.6	編成組成	012
1.7	補機類	013
1.8	ブレーキ	013
1.9	電気車の運転	015
第2章	制御方式の歴史	017
2.1	車両技術の方向性	018
2.2	黎明期の電気鉄道	019
2.3	海外からの技術導入	019
2.4	旧性能車の時代	020
2.5	新性能車の登場	021
2.6	抵抗制御の改良	022
2.7	交流電気車	024
2.8	チョップ制御	025
2.9	VVVF インバータ制御	025
2.10	PWM コンバータ	027
2.11	各制御方式のまとめ	028
第3章	基礎数学・物理・電気	029
3.1	微分・積分	030
3.2	三角関数	031
3.3	ベクトル	032
3.4	力学	032
3.5	電圧・電流・抵抗	033
3.6	交流	035
3.7	電磁気学	036
3.8	受動素子	039
3.9	変圧器	041
3.10	半導体素子	043
3.11	パワーエレクトロニクス	044
3.12	電気車の電気機器	045
3.13	回路図記号	046
第4章	直流機	047
4.1	直流機の基本原理	048
4.2	直流機の構造	049
4.2.1	電機子鉄芯	049
4.2.2	電機子巻線	050

4.2.3	整流子	052
4.2.4	整流	053
4.2.5	補極と補償巻線	053
4.3	直流電動機の特性	054
4.4	発電制動	056
4.5	回生制動	058
4.6	複巻電動機	058

第5章 抵抗制御 059

5.1	抵抗制御の基礎	060
5.1.1	抵抗制御	060
5.1.2	直並列制御	060
5.1.3	弱め界磁制御	063
5.2	抵抗制御の詳細	064
5.2.1	減流速断	064
5.2.2	直接制御と間接制御	064
5.2.3	手動進段と自動進段	065
5.2.4	主制御器	065
5.2.5	多段制御の効果	066
5.2.6	バーニア制御	066
5.2.7	発電制動	067
5.2.8	抑速制動	068
5.2.9	主抵抗器	068
5.2.10	抵抗制御車とエネルギー	069
5.3	抵抗制御車の実例	069
5.4	複巻電動機の制御	072
5.5	界磁添加励磁制御	075

第6章 チョツパ制御 077

6.1	抵抗制御の問題点	078
6.2	チョツパ	078
6.2.1	降圧チョツパ	078
6.2.2	昇圧チョツパ	079
6.2.3	スイッチング	080
6.3	サイリスタ	080
6.3.1	サイリスタの動作	080
6.3.2	転流回路	081
6.3.3	GTO サイリスタ	082
6.3.4	スナバ回路	083
6.3.5	素子の直並列接続	083
6.3.6	素子の損失と冷却	084
6.3.7	通流率の制限と可変周波数起動	084
6.4	電機子チョツパ制御	085
6.4.1	力行／制動転換	085
6.4.2	フィルタ回路	085
6.4.3	多相多重チョツパ	086

6.4.4	電機子チョッパ制御車の実例	086
6.4.5	回生可能領域の拡大	087
6.5	分割界磁式チョッパ	088
6.5.1	AVF チョッパ	089
6.5.2	AFE チョッパ	089
6.6	4象現チョッパ	092
第7章 制御回路		095
7.1	制御回路の概要	096
7.2	主幹制御器	097
7.3	主制御器	097
7.3.1	カム軸・カム電動機	097
7.3.2	無接点継電器	099
7.3.3	空転検知回路	100
7.3.4	遮断器	100
7.4	制御回路の動作	100
7.4.1	初期状態	100
7.4.2	ノッチオン	100
7.4.3	ノッチオフ	102
7.4.4	再力行	103
7.4.5	ブレーキ	103
7.5	界磁添加励磁制御車の制御回路	104
7.6	チョッパ制御車の制御回路	106
7.7	制御伝送と車両情報システム	106
第8章 誘導電動機		107
8.1	直流機の問題点	108
8.2	誘導電動機の基本原理	108
8.3	三相交流	109
8.4	誘導機の構造	110
8.4.1	回転磁界の発生	110
8.4.2	界磁の構造	111
8.4.3	電機子の構造	111
8.5	誘導電動機の特性と制御	112
8.5.1	同期速度とすべり	112
8.5.2	すべり周波数制御	113
8.5.3	ベクトル制御	115
8.6	リニアモータ	116
第9章 VVVF インバータ		117
9.1	インバータ	118
9.1.1	インバータの基本	118
9.1.2	パルス幅変調	118
9.1.3	スイッチング素子	120
9.1.4	装置の冷却	121
9.2	VVVF インバータ制御	122

9.2.1	主回路	122
9.2.2	制御単位	123
9.2.3	3レベルインバータ	123
9.3	VVVF インバータ制御車の進化	125
9.3.1	補助電源装置との共用化	125
9.3.2	発電・回生ブレンディングブレーキ	125
9.3.3	純電気ブレーキ	126

第10章 交流・交直流電気車 127

10.1	交流電気車の基礎	128
10.1.1	交流電気車の基本構成	128
10.1.2	主変圧器	128
10.1.3	整流器	129
10.1.4	整流回路	130
10.1.5	脈流	130
10.1.6	位相制御	131
10.2	交流電気車の制御方式(直流電動機)	131
10.2.1	タップ制御	132
10.2.2	タップ間連続制御	135
10.2.3	全電圧無接点制御	136
10.2.4	位相制御による回生制動	138
10.3	交流電気車の制御方式(VVVF インバータ)	140
10.3.1	サイリスタブリッジ+ VVVF インバータ	140
10.3.2	PWM コンバータの動作	140
10.3.3	PWM コンバータ電気車の主回路構成	144
10.4	新交通システム	145
10.5	交直流電気車	145

第11章 技術開発の動向と将来の制御方式 147

11.1	環境への対応	148
11.1.1	騒音環境の改善	148
11.1.2	電磁両立性(EMC)	149
11.2	同期電動機駆動	149
11.2.1	永久磁石同期電動機(PMSM) 駆動	149
11.2.2	ダイレクトドライブモータ(DDM)	150
11.3	交流電気車での技術開発	151
11.3.1	超電導主変圧器	151
11.3.2	中間周波数変換器方式	151
11.3.3	マトリックスコンバータ	152
11.4	ハイブリッド電気車	153

参考文献等 155

索引 156

Introduction to Train Traction System Third Edition

Chapter 1 Basis of Electric Rolling Stock

第 1 章 電気車の基礎

本章では「電気車とは何か」から始まって、電気鉄道、電気車及び制御方式に関する極めて基本的な事柄に関し説明します。当たり前と思われることについても多く書かれているかもしれませんが、いずれもこの後の各章の基礎となるような事柄となっています。