

制御方式入門

改訂第四版

電気が走るための電気回路
主回路システムの全て

重野誉敬 著

本書は電気車の各種制御方式（主回路システム）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主回路システムに少しでも興味を持っていただければ幸いです。

はじめに

本書は電気車の各種制御方式(主回路システム)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(主回路システム)に少しでも興味を持っていただければ幸いです。

制御方式について、歴史的な方式から現在用いられている方式まで、可能な限り網羅的に紹介するようにしております。また、説明に際しては一般論のみならず、実際の車両の主回路ツナギを例示し、具体的に説明するようにしてあります。

改訂第四版によせて

本書の初版は1999年12月に発行されました。2009年12月に発行した「制御方式入門 改訂第三版」はこれまでにない好評を得ました。

10年振りとなる改訂第四版では、第三版のコンセプトを踏襲しつつ、全体の構成及び全ての掲載図について見直したたことに加え、最新の動向を盛り込んでいます。特に、この10年間での主回路システムの飛躍的な進歩である「SiC素子適用インバータ」「永久磁石同期電動機(PMSM)」および「バッテリーの活用」について、これらの特長を詳しく解説しております。最新の動向について積極的に取り込んだだけでなく、抵抗制御など従来からの制御方式についても、掲載する車種の再検討を行い、新たに多くの車種の主回路ツナギ・解説を記載しております。

本書と通じて、主回路システムに興味を持っていただき、「制御方式の本質」に対する理解を深めていただければ幸いです。

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。

掲載している主回路ツナギ図は、原則として製造当初の初期車両です。また、掲載している主回路ツナギ図の記号については、原則として元図に基づいております。従って同じ機器であってもメーカーや鉄道事業者により記号が異なっている場合があります。

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。

本書に掲載の図表の一部を、「制御方式入門」サイトに掲載しております。

<http://seigyو.qdat.jp/>

本書の構成と読み方

基礎編

電気鉄道と電気車に関する基礎的な事柄を説明しています。歴史や制御方式（主回路システム）の種類の詳細に加え、本書の理解に必要とある数学・物理・電気の基礎について説明しています。後の章でも基本となる事柄ですので、必要に応じ参照して下さい。

第1章 電気鉄道と電気車の基礎

第2章 主回路システムの歴史

第3章 数学・物理・電気の基礎

直流機編

古くから電気車の主回路システムで用いられてきた直流電動機の制御方式の解説です。第4章では直流電動機の原理、構造、特性を説明します。第5章では直流機の高古からの制御方式である抵抗制御およびその改良版である界磁チョッパ、界磁添加励磁制御について説明します。第6章では大容量半導体素子を用いるチョッパ制御について説明します。

第4章 直流電動機

第5章 抵抗制御

第6章 チョッパ制御

制御回路編

主回路システムから離れ、主回路機器を制御する制御回路について説明します。併せて、車両情報システムについても触れています。

第7章 制御回路と列車情報システム

VVVF インバータ制御編

現在主流の制御方式である VVVF インバータ制御について説明します。第8章では VVVF インバータ制御で主電動機として用いられる誘導機の原理と特性を説明し、第9章では VVVF インバータの原理や動作などについて説明します。

第8章 誘導電動機

第9章 VVVF インバータ

交流・交直流電気車編

交流電気車に関し、特有の機器及び制御方式について説明しています。また、三相交流電化の新たな交通システムについても解説するとともに、交直流電気車についても説明しています。

第10章 交流・交直流電気車

新しい制御方式編

近年、急速に進歩し、普及している「SiC 素子適用インバータ」「永久磁石同期電動機 (PMSM)」「バッテリーの活用」について説明します。また、現在研究中で、将来登場が期待される制御方式についても説明します。

第11章 新しい制御方式・将来の制御方式

第1章	電気鉄道と電気車の基礎	009
1.1	電気鉄道と電気車	010
1.2	電気方式	011
1.3	電気車の基本構成	011
1.4	主回路システムに求められる要件	013
1.5	制御方式の種類	014
1.6	動力集中方式と動力分散方式	016
1.7	編成組成	016
1.8	補機類	018
1.9	ブレーキ	018
1.10	電気車の運転	021
第2章	主回路システムの歴史	023
2.1	車両技術の方向性	024
2.2	黎明期の電気鉄道	025
2.3	海外からの技術導入	026
2.4	旧性能電車の時代	026
2.5	新性能電車の登場	027
2.6	抵抗制御の改良	030
2.7	交流電気車	031
2.8	チョッパ制御	032
2.9	VVVF インバータ制御	033
2.10	PWM コンバータ	035
2.11	近年の動向	036
2.12	各制御方式のまとめ	036
第3章	数学・物理・電気の基礎	037
3.1	微分・積分	038
3.2	三角関数	039
3.3	ベクトル	040
3.4	力学	041
3.5	電圧・電流・電気抵抗	043
3.5.1	電圧・電流	043
3.5.2	電気抵抗とオームの法則	043
3.5.3	抵抗の接続	044
3.5.4	電力	044
3.5.5	回路の基本法則	044
3.5.6	ホイートストンブリッジ	045
3.6	交流	045
3.6.1	周波数	045
3.6.2	交流の電圧の表記	046
3.7	電磁気学	046
3.7.1	磁界の基本法則	046
3.7.2	電磁誘導の法則	047
3.7.3	自己誘導と相互誘導	047

3.7.4	フレミングの法則	048
3.7.5	磁性材料	048
3.8	受動素子	049
3.8.1	コイル	049
3.8.2	コンデンサ	049
3.8.3	受動素子の性質	049
3.8.4	受動素子と交流	050
3.8.5	交流の電力と力率	050
3.8.6	受動素子と直流	051
3.9	変圧器	052
3.9.1	変圧器	052
3.9.2	可飽和リアクトル・磁気増幅器	052
3.10	半導体素子	054
3.10.1	半導体材料	054
3.10.2	ダイオード	055
3.10.3	トランジスタ	055
3.10.4	集積回路	055
3.11	パワーエレクトロニクス	056
3.12	電気車の電気機器	056
3.12.1	スイッチ	056
3.12.2	絶縁と定格	057
3.13	電気用図記号	058

第4章 直流電動機 059

4.1	直流電動機の基本原理	060
4.2	直流機の構造	062
4.2.1	極数	062
4.2.2	電機子鉄心	062
4.2.3	電機子巻線	062
4.2.4	整流子	065
4.2.5	整流	066
4.2.6	補極と補償巻線	067
4.2.7	固定子・界磁	067
4.3	直流電動機の特長	068
4.3.1	逆起電力	068
4.3.2	直流機の励磁方式	069
4.4	弱め界磁	070
4.5	直流直巻電動機の特長図	071
4.6	発電ブレーキ	071
4.7	回生ブレーキ	073
4.8	複巻電動機	073
4.9	主電動機の冷却	074

第5章 抵抗制御 075

5.1	抵抗制御の基礎	076
5.1.1	抵抗制御の基本原則	076

5.1.2	直並列制御	076
5.1.3	弱め界磁制御	078
5.2	抵抗制御の詳細	078
5.2.1	減流遮断	078
5.2.2	直接制御と間接制御	079
5.2.3	手動進段と自動進段	079
5.2.4	主制御器	080
5.2.5	多段制御の効果	081
5.2.6	主抵抗器群の構成	081
5.2.7	バーニア制御	082
5.2.8	発電ブレーキ	083
5.2.9	抑速ブレーキ	083
5.2.10	主抵抗器の冷却	084
5.2.11	抵抗制御車とエネルギー	084
5.3	抵抗制御車の実例	085
5.3.1	直接制御車	085
5.3.2	旧性能電車	085
5.3.3	CS15形主制御器	087
5.3.4	カムダイヤグラム	090
5.4	複巻電動機の制御	092
5.5	界磁添加励磁制御	095
5.6	直流電気機関車	097
5.6.1	直流電気機関車の主回路の特徴	097
5.6.2	F級電気機関車における直並列制御	097
5.6.3	直流電気機関車でバーニア制御	099
5.6.4	軸重補償	099
5.6.5	直流電気機関車の実例	100

第6章 チョッパ制御

103

6.1	抵抗制御の問題点	104
6.2	チョッパ	104
6.2.1	降圧チョッパ	104
6.2.2	昇圧チョッパ	105
6.2.3	スイッチング	106
6.3	サイリスタ	106
6.3.1	サイリスタの動作	106
6.3.2	転流回路	107
6.3.3	GTOサイリスタ	108
6.3.4	スナバ回路	109
6.3.5	スイッチング素子の直並列接続	110
6.3.6	素子の損失と冷却	110
6.3.7	通流率の制限と低周波数起動	111
6.3.8	フィルタ回路	112
6.4	電機子チョッパ制御の詳細	112
6.4.1	力行／制動転換	112
6.4.2	多相多重チョッパ	113

6.4.3	チョップ制御の省エネルギー効果	114
6.4.4	回生可能速度域の拡大策	114
6.5	電機子チョップ制御車の实例	116
6.6	分割界磁式チョップ	117
6.6.1	AVF チョップ	117
6.6.2	AFE チョップ	118
6.7	4象現チョップ	121

第7章 制御回路と車両情報システム 125

7.1	制御回路の概要	126
7.2	主幹制御器	127
7.3	主制御器	128
7.3.1	主制御器の構造	128
7.3.2	無接点継電器	130
7.3.3	空転検知回路	131
7.4	制御回路の動作	131
7.5	界磁添加励磁制御車の制御回路	136
7.6	チョップ制御車の制御回路	138
7.7	制御伝送と車両情報システム	138

第8章 誘導電動機 139

8.1	直流電動機の問題点	140
8.2	誘導電動機の基本原理	140
8.3	三相交流	142
8.4	誘導機の構造	142
8.4.1	回転磁界の発生	142
8.4.2	界磁の構造	143
8.4.3	電機子の構造	144
8.5	誘導電動機の特性と制御	145
8.5.1	同期速度とすべり	145
8.5.2	すべり周波数制御	146
8.5.3	ベクトル制御	148
8.6	誘導電動機の冷却	149
8.7	リニアモータ	150

第9章 VVVF インバータ制御 151

9.1	インバータ	152
9.1.1	インバータの基本	152
9.1.2	パルス幅変調	152
9.1.3	スイッチング素子	154
9.1.4	インバータ装置の冷却	156
9.2	VVVF インバータ制御車	157
9.2.1	制御単位	157
9.2.2	主回路ツナギ	158
9.2.3	3レベルインバータ	159
9.3	VVVF インバータ制御車の進化	160

9.3.1 補助電源装置との共用化	161
9.3.2 発電・回生ブレンディングブレーキ	161
9.3.3 純電気ブレーキ	162

第10章 交流・交直流電気車 163

10.1 交流電気車の基礎	164
10.1.1 交流電気車の基本構成	164
10.1.2 主変圧器	165
10.1.3 整流器	166
10.1.4 整流回路	167
10.1.5 脈流	168
10.1.6 位相制御	168
10.2 交流電気車の制御方式(直流電動機)	169
10.2.1 タップ制御	170
10.2.2 タップ間連続制御	174
10.2.3 全電圧無接点制御	174
10.2.4 位相制御による交流回生ブレーキ	176
10.3 交流電気車の制御方式(VVVFインバータ)	179
10.3.1 サイリスタブリッジ+VVVFインバータ	180
10.3.2 PWMコンバータの動作	180
10.3.3 ビートレス制御と停電検出機構	184
10.3.4 PWMコンバータ電気車の主回路構成	184
10.4 新交通システム	186
10.5 交直流電気車	186
10.5.1 交直流電気車の構成	186
10.5.2 交直切換	187
10.5.3 交直流電気車の主回路例	188

第11章 新しい制御方式・将来の制御方式 189

11.1 SiC素子適用インバータ	190
11.1.1 SiCパワーモジュール	190
11.1.2 SiC適用インバータの省エネ効果	191
11.2 永久磁石同期電動機(PMSM)	193
11.3 バッテリーの活用	197
11.3.1 リチウムイオンバッテリー	197
11.3.2 ハイブリッド電気車	197
11.3.3 架線・バッテリーハイブリッド車両	198
11.3.4 非常走行用電源	199
11.3.5 電気二重層キャパシタ(EDLC)の活用	199
11.3.6 燃料電池	200
11.4 交流電気車での技術開発	201
11.4.1 超電導主変圧器	201
11.4.2 中間周波数変圧器方式	201
11.4.3 マトリックスコンバータ	202

主要参考文献・主要参考WWWサイト・索引 203