

電 気 回 路 論

目 次

第 1 章 電気回路の基礎

1.1 概 説	1
1.2 キルヒホッフの法則	1
1.2.1 キルヒホッフの第1法則（電流連続の法則）	1
1.2.2 キルヒホッフの第2法則（電圧平衡の法則）	2
1.3 電気回路の素子	3
1.3.1 抵 抗 素 子	3
1.3.2 誘 導 素 子	3
1.3.3 容 量 素 子	3
1.3.4 線形素子と非線形素子	4
1.4 直流回路の基礎	5
1.5 直流の電力および電力量	6
1.6 直 列 回 路	7
1.7 並 列 回 路	8
1.8 ホイートストンブリッジ	9
1.9 消費電力最大のための負荷抵抗	11
1.10 摘 要	14
1.11 問 題	14

第 2 章 交流電圧・電流・電力

2.1 正弦波電圧・電流	18
2.2 ひずみ波交流（周期波）	20
2.2.1 ひずみ波交流のフーリエ級数による展開	20
2.2.2 特殊な形のひずみ波	21

対称波の場合—— $y(t)$ が t に関して奇関数の場合 —— $y(t)$ が
 t に関して偶関数の場合

2.2.3 ひずみ波の実効値	27
2.3 抵抗回路	28
2.4 誘導回路	30
2.5 容量回路	32
2.6 RLC 直列回路	34
2.6.1 瞬時電圧	35
2.6.2 瞬時電流	36
2.6.3 瞬時電力と平均電力	37
2.6.4 無効電力	37
2.7 正弦波電圧・電流の電力	38
2.8 ひずみ波電圧・電流の電力	39
2.9 摘 要	41
2.10 問 題	42

第 3 章 交流回路の複素計算法

3.1 正弦波の複素数表示	45
3.2 インピーダンスとアドミタンス	47
3.3 電力の複素数表示	49
3.4 ベクトル図	51
抵抗 R のみの回路——インダクタンス L のみの回路——容量 C のみの回路—— RLC の直列回路	
3.5 ベクトル軌跡	54
実部が一定なベクトルの軌跡——虚部が一定なベクトルの軌跡 ——実部の一定なベクトルと他の一定ベクトルとの積の軌跡 ——実部の一定なベクトルの逆数の軌跡——虚部の一定なベク トルの逆数の軌跡——直線をえがくベクトルの逆数の軌跡—— 円をえがくベクトルの逆数の軌跡	
3.6 摘 要	58
3.7 問 題	59

第 4 章 交流回路

4.1 交流回路の基礎	61
4.2 直列回路と並列回路	62
4.2.1 直列回路	62
4.2.2 並列回路	63
4.3 RL 直列回路と RL 並列回路	65
4.3.1 RL 直列回路	65
4.3.2 RL 並列回路	69
4.4 RC 直列回路と RC 並列回路	74
4.4.1 RC 直列回路	74
4.4.2 RC 並列回路	77
4.5 RLC 直列回路 (直列共振回路) と RLC 並列回路 (並列共振回路)	79
4.5.1 RLC 直列回路 (直列共振回路)	79
4.5.2 RLC 並列回路 (並列共振回路)	87
4.6 並直列回路	90
7.4 はしご形回路	92
4.8 相互誘導回路	93
4.9 ブリッジ回路	96
4.10 摘 要	99
4.11 問 題	101

第 5 章 一般線形回路網

5.1 概 説	112
5.2 閉路方程式	112
5.3 節点方程式	116
5.4 グラフ理論における基本的概念	119
道——閉路——木, 補木——カットセット——カットセットの 基本系——閉路の基本系	
5.5 グラフの行列表示	123
5.5.1 節点接続行列	123

5.5.2	接続行列	124
5.5.3	カットセット行列	125
5.5.4	閉路行列	126
5.5.5	カットセット行列と閉路行列の性質	127
5.6	キルヒホッフの法則	129
5.6.1	キルヒホッフの第1法則(電流法則)	129
5.6.2	キルヒホッフの第2法則(電圧法則)	130
5.7	回路解析	131
5.7.1	閉路方程式	131
5.7.2	カットセット方程式	135
5.8	双対性	138
5.9	重ねの理	140
5.10	相反定理	142
	一般の場合——特別の場合	
5.11	補償定理	145
	定理——証明	
5.12	テブナンの定理とノルトンの定理	147
	定理——証明	
5.13	電気回路のエネルギー	148
	ラグランジュの方程式——回路網の磁気エネルギー——回路網 の位置エネルギー——回路網の全消費関数 F ——ラグランジュ の方程式によるキルヒホッフの法則の誘導—— T , U および F の平均値	
5.14	摘要	154
5.15	問題	155

第6章 一端子対回路

6.1	概説	157
6.2	一般一端子対回路のインピーダンス	157
6.2.1	受動一端子対回路のインピーダンス	157
6.2.2	一端子対インピーダンスのエネルギーの項による表現	159
6.3	リアクタンス一端子対回路	161

6.3.1	リアクタンス定理	161
	簡単なリアクタンス一端子対回路の周波数特性——一般のリアクタンス一端子対回路の周波数特性——リアクタンス関数——リアクタンス定理	
6.3.2	並列共振回路の直列接続による構成	169
6.3.3	直列共振回路の並列接続による構成	171
6.3.4	はしご形回路による構成	173
6.4	RL 一端子対回路	175
6.4.1	RL 駆動点インピーダンスの性質	175
6.4.2	RL 並列回路の直列接続による構成	176
6.4.3	RL 直列回路の並列接続による構成	176
6.4.4	RL のはしご形回路による構成	177
6.5	RC 一端子対回路	178
6.5.1	RC 駆動点インピーダンスの性質	178
6.5.2	RC 駆動点インピーダンスの構成	178
6.6	逆回路	179
6.6.1	逆回路の定義	179
6.6.2	逆回路の作り方	180
6.7	定抵抗回路	181
6.8	摘 要	182
6.9	問 題	184

第 7 章 二端子対回路

7.1	概 説	185
7.2	インピーダンスパラメータ	185
7.2.1	定義と基礎方程式	185
7.2.2	二端子対回路の直列接続	187
7.3	アドミタンスパラメータ	188
7.3.1	定義と基礎方程式	188
7.3.2	二端子対回路の並列接続	189
7.4	H パラメータ	190
7.4.1	定義と基礎方程式	190
7.4.2	二端子対回路の直並列接続	191

7.5	G パラメータ	191
7.5.1	定義と基礎方程式	191
7.5.2	二端子対回路の並直列接続	192
7.6	四端子定数	193
7.6.1	定義と基礎方程式	193
7.6.2	四端子定数の物理的意義	194
7.6.3	二端子対回路の縦続接続	195
7.6.4	入力端子, 出力端子の入れ換えと K パラメータ	198
7.7	映像パラメータ	199
7.7.1	映像インピーダンスの定義	199
7.7.2	映像インピーダンスと四端子定数との関係	200
7.7.3	映像インピーダンスと短絡アドミタンスおよび開放インピーダンスとの関係	200
7.7.4	伝達定数 θ の定義	201
7.7.5	四端子定数と映像パラメータの関係	202
7.7.6	映像パラメータによる二端子対回路の基礎方程式	202
7.7.7	映像パラメータによる縦続接続	203
7.8	反復パラメータ	204
7.8.1	反復インピーダンスの定義	204
7.8.2	反復インピーダンスと四端子定数との関係	204
7.8.3	伝般定数と四端子定数との関係	205
7.8.4	反復パラメータによる二端子対回路の縦続接続	206
7.8.5	対称二端子対回路の反復パラメータ	206
7.9	バーレットの2等分定理	209
7.10	摘 要	212
7.11	問 題	214

第 8 章 多 相 交 流

8.1	概 説	217
8.2	多相方式	217
8.2.1	多相方式の種類	217
8.2.2	星形結線と環状結線	218
8.2.3	星形および環状起電力・電流	219

8.3 対称多相交流	220
8.3.1 対称 n 相交流の起電力	220
8.3.2 対称 n 相交流の星形起電力と環状起電力との関係	220
8.3.3 対称 n 相交流の星形電流と環状電流との関係	222
8.4 対称三相交流	223
8.4.1 対称三相交流の起電力	223
8.4.2 対称三相交流の Y 起電力と Δ 起電力との関係	224
8.4.3 対称三相交流の Y 電流と Δ 電流との関係	225
8.5 対称 Y 形起電力と Y 形負荷	226
8.5.1 線路のインピーダンスを考慮しない場合	226
8.5.2 線路のインピーダンスを考慮する場合	227
8.6 対称 Y 形起電力と Δ 形負荷	228
8.7 対称 Δ 形起電力と Y 形負荷	229
8.8 対称 Δ 形起電力と Δ 形負荷	230
8.9 非対称三相交流回路	232
8.9.1 Y 形結線回路	232
8.9.2 Δ 形結線回路	234
Δ 形起電力を Y 形負荷に加えた場合—— Δ 形起電力を Δ 形負荷 に加えた場合	
8.9.3 Δ 形起電力と Y 形起電力の換算	234
Δ より Y への換算——Y より Δ への換算	
8.10 多相交流回路の電力	237
8.10.1 対称多相交流回路の電力	237
8.10.2 非対称多相交流回路の電力	239
8.10.3 対称三相交流回路の電力	239
8.10.4 ブロンドルの定理	239
8.10.5 二電力計法	240
8.11 対称座標法	241
8.11.1 非対称三相起電力の座標変換	242
8.11.2 三相對称座標法	242
8.12 対称座標による Y- Δ 換算	245
8.12.1 起電力の Y- Δ 換算	245
8.12.2 電流の Y- Δ 換算	248

8.13 インピーダンスおよびアドミタンスの対称座標変換	249
8.13.1 Y形インピーダンスの対称座標変換	249
8.13.2 Y形アドミタンスの対称座標変換	251
8.13.3 Y形平衡回路の対称座標	252
8.13.4 Y形インピーダンスに相互インピーダンスがある場合の対称座標.....	252
8.13.5 相互インピーダンスのあるY形平衡回路の対称座標	254
8.14 三相交流電源電圧	255
8.14.1 非対称起電力と内部インピーダンス	255
8.14.2 電源各相の内部インピーダンスが等しい場合	256
8.14.3 三相交流発電機の基本式	256
8.15 対称分による電力表示	261
8.16 回 転 磁 界	263
8.17 摘 要	264
8.18 問 題	266

第 9 章 基本回路の過渡現象

9.1 総 説	274
9.2 RL 回 路	274
9.2.1 直流電圧電源を印加した場合	274
微分方程式とその解——時定数	
9.2.2 直流電圧電源を取り去る場合	277
微分方程式とその解	
9.2.3 直流電圧電源をある時間印加した後取り去る場合.....	278
9.3 RC 回 路	279
9.3.1 コンデンサの充電	279
微分方程式とその解——時定数—— R および C の端子電圧	
9.3.2 コンデンサの放電	281
9.3.3 電荷を持っている容量 C と抵抗 R の直列回路に直流電圧電源 E を 印加する場合	282
9.3.4 RC 回路に直流電圧電源を印加した後取り去る場合	283
9.4 LC 回 路	284
9.4.1 直流電圧電源を印加する場合	284
9.4.2 充電されている容量をインダクタンスを通じて放電する場合	287

9.5 RLC 回路	288
9.5.1 RLC 回路に直流電圧電源を印加する場合	288
微分方程式とその一般解—— $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ の場合—— $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ の場合—— $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} < 0$ の場合	
9.5.2 RLC 回路に交流電源を印加する場合	297
$R^2 - 4\frac{L}{C} > 0$ の場合 (非振動的)—— $R^2 - 4\frac{L}{C} = 0$ の場合 (臨界 的)—— $R^2 - 4\frac{L}{C}$ の場合 (振動的)	
9.6 摘要	305
9.7 問題	307

第 10 章 演算子法

10.1 概説	310
10.2 ヘビサイドの演算子	311
10.2.1 単位関数	311
10.2.2 RL 直列回路に直流電圧印加の場合	311
10.2.3 RC 直列回路に直流電圧印加の場合	314
10.2.4 一般波形電圧印加の場合	314
10.3 ラプラス変換の定義	315
10.4 ラプラス変換の諸法則	317
10.4.1 線形則	317
10.4.2 相似則	317
10.4.3 $f(t)$ の微分	318
10.4.4 $f(t)$ の積分	318
10.4.5 $f(t)$ の変数推移	319
10.4.6 $F(s)$ の微分	319
10.4.7 $F(s)$ の積分	320
10.4.8 $F(s)$ の変数推移	320
10.4.9 相乗定理	321
10.4.10 その他よく用いられる法則	322
10.5 定数係数線形微分方程式の演算子法	322

10.6	線形電気回路網の演算子法	323
10.7	ヘビサイドの展開定理	328
10.8	ラプラス変換公式集	330
10.9	摘 要	334
10.10	問 題	335

第 11 章 分布定数回路

11.1	分布定数回路の基礎方程式	338
11.2	正弦波交流における分布定数回路	339
11.2.1	基礎方程式	339
11.2.2	指数関数による基礎方程式の解	340
11.2.3	双曲線関数による基礎方程式の解	341
11.3	特性インピーダンスおよび伝搬定数	342
11.3.1	無限長路線	342
11.3.2	特性インピーダンス	343
11.3.3	伝 搬 定 数	343
11.3.4	無損失線路	345
11.3.5	無ひずみ線路と伝搬ひずみ	345
11.4	端条件による電圧・電流分布	346
11.4.1	送電端の電圧 V_A 、電流 I_A を与える場合	346
11.4.2	受電端の電圧 V_B 、電流 I_B を与える場合	347
11.4.3	送電端電圧 V_A と受電端電圧 V_B とを与える場合	347
11.4.4	送電端電流 I_A と受電端電流 I_B とを与える場合	347
11.4.5	送電端電圧 V_A と受電負荷インピーダンス Z_B とを与える場合	348
11.4.6	送電端電流 I_A と受電端負荷インピーダンス Z_B とを与える場合	348
11.5	角 位 置	349
11.5.1	位置角の定義	349
11.5.2	電圧分布の位置角による表示	350
11.5.3	電流分布の位置角による表示	350
11.5.4	インピーダンスの位置角による表示	351
11.5.5	受電端短絡の場合	351
11.5.6	受電端開放の場合	352
11.6	分布直列インピーダンスおよびアドミタンスの測定	352

11.7 有限長線路の等価二端子対回路	353
11.7.1 T形等価回路	353
11.7.2 π 形等価回路	354
11.7.3 格子形等価回路	354
11.8 反射および透過	355
11.8.1 負荷インピーダンスによる反射現象	355
電圧・電流の反射係数——有限長線路の電圧分布	
11.8.2 異種の無限長線路の接続点における反射および透過	357
11.8.3 3種類の線路の接続点における反射	358
11.8.4 インピーダンス整合	360
11.9 線路の共振	361
11.9.1 受電端短絡の場合	361
11.9.2 受電端開放の場合	363
11.9.3 受電端負荷がリアクタンスなる場合	365
11.10 分布定数回路の過渡現象	366
11.10.1 基本式	366
11.10.2 $V(x, s)$ の基本式	367
11.10.3 $I(x, s)$ の基本式	367
11.10.4 $V(x, s)$ と $I(x, s)$ の一般解	367
11.10.5 送端電圧 $V(0, s)$ と送端電流 $I(0, s)$ を与えた場合	368
11.10.6 受端電圧 $V(l, s)$ と受端電流 $I(l, s)$ を与えた場合	369
11.11 無限長線路の過渡現象	369
11.11.1 無損失線路 (LC 線路)	370
11.11.2 無ひずみ線路	371
11.11.3 RC 線路	371
電圧 $V(x, s)$, 電流 $I(x, s)$ の値—— $\varepsilon^{-a\sqrt{s}}$ の時間関数——	
$\varepsilon^{-a\sqrt{s}}$ の時間関数—— $\frac{1}{\sqrt{s}}\varepsilon^{-a\sqrt{s}}$ の時間関数——電圧 v	
(x, t) , 電流 $i(x, t)$ の値	
11.11.4 $G=0$ の線路	375

$$\frac{1}{s}\varepsilon^{-\frac{1}{s}} \text{ の時間関数——} \frac{\varepsilon^{-\xi\sqrt{s^2+a^2}}}{\sqrt{s^2+a^2}} \text{ の時間関数——}$$

	$\frac{-x}{w\sqrt{(s+a)^2-a^2}}$ の時間関数——電流 $i(x, t)$ の値——電圧 $v(x, t)$ の値	
11. 11. 5	一般線路の場合 電圧 $V(x, s)$, 電流 $I(x, s)$ の値——電流 $i(x, t)$ の値——電圧 $v(x, t)$ の値	379
11. 12	有限長線路の過渡現象	381
11. 12. 1	演算子法による基本式 送端における電圧 $V(0, s)$, 電流 $I(0, s)$ ——任意の点 x における電圧 $V(x, s)$, 電流 $I(x, s)$ ——任意点 x における指数関数による電圧 $V(x, s)$ ——任意点 x における指数関数による電流 $I(x, s)$ —— $v(x, t)$, $i(x, t)$ の求め方	381
11. 12. 2	有限長無損失線路 他端開放——他端接地	384
11. 12. 3	有限長無損失線路の演算子法 受端を開放し, 送端に内部抵抗 0 の直流起電力を印加する場合——受端を短絡し, 送端に内部抵抗 0 の直流起電力を印加する場合	389
11. 12. 4	有限長 RC 線路 基本式——受端を短絡し, 内部抵抗 0 なる直流起電力を印加する場合——受端を開放し, 内部抵抗 0 なる直流起電力を印加する場合	395
11. 12. 5	有限長一般線路 受端を短絡し, 内部抵抗 0 なる直流起電力を印加する場合——受端を開放し, 内部抵抗 0 なる直流起電力を印加する場合	400
11. 13	摘 要	406
11. 14	問 題	410
付録	行列と複素関数の基礎知識	412
索 引		430