地区电网无功补偿与电压无功控制

李宏仲　金义雄　王承民　段建民　编著



DIQU DIANWANG WUGONG BUCHANG YU DIANYA WUGONG KONGZHI

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

地区电网无功补偿与电压无功控制

李宏仲　金义雄　王承民　段建民　编著
李国庆　主审



机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了电力系统无功补偿及电压无功控制方面的理论和相关的设备及控制方法。全书共分为10章。第1章：概述了无功补偿与无功规划等电力系统分析计算所需的基本数学模型和方法；第2章：介绍了与无功功率和电压控制相关的基本概念；第3章：介绍了电网损耗的基本定义和常用的网损计算方法；第4章：介绍了电网损耗计算与管理软件的基本功能；第5章：介绍了无功补偿技术的发展现状和目前已有的各类无功补偿设备的功能和基本结构；第6章：介绍了无功规划的基本理论和计算方法；第7章：介绍了电力系统无功优化的基本概念、算法，以及无功优化与无功规划的区别与联系；第8章：重点介绍了配电网中无功补偿的实用方法；第9章：介绍了电压无功自动控制的基本目的、发展历程以及较为实用的AVC技术与系统结构；第10章：重点介绍了电压无功自动控制的最新进展：集中—分布协调控制模式。

本书可作为电力系统相关专业的本、专科及研究生的教材，也可作为电力公司从事电压无功技术的专业人员的参考书籍。

图书在版编目（CIP）数据

地区电网无功补偿与电压无功控制/李宏仲等编著. —北京：机械工业出版社，2012.4
ISBN 978-7-111-37480-0

Ⅰ.①地… Ⅱ.①李… Ⅲ.①电力系统－功率补偿－无功补偿②电力系统－电压控制 Ⅳ.①TM714.3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第025158号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：赵玲丽 责任编辑：赵玲丽
版式设计：霍永明 责任校对：张 媛
封面设计：陈 沛 责任印制：乔 宇
北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）
2012年4月第1版第1次印刷
169mm×239mm·12印张·238千字
0 001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-37480-0
定价：33.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

电力工业是国民经济的基础，而优良的电能质量是国民经济发展和人民正常生产生活的重要保证。电力系统中的电压水平与无功功率的分布情况密切相关，电力系统中无功功率的变化，会使各节点电压发生变化，并引起电力线路和变压器的损耗发生变化。近年来，随着电网容量的增加，无功潮流分布对电力系统的电压质量和网络损耗的影响日益突出，电力生产中对电压无功的自动控制要求也与日俱增。因此，合理的无功规划与优化以及无功补偿技术、电压无功控制技术的灵活应用就成为提高电力系统电能质量水平，降低网络损耗并保障系统安全运行的重要技术手段。

本书从实用性角度出发，围绕电力系统无功补偿、电网损耗、无功规划优化以及电压无功自动控制，详细介绍了相关方面的发展现状以及实用化的技术手段。

编著者在电压无功规划优化和电压无功自动控制方面具有较为深厚的研究基础和实践经验。编著者分别负责了国家自然科学基金和国家863项目的研究，还承担了多项实际工程项目的应用开发，并获得多个奖项和专利。本书诸多内容正源自这些项目的成果，使本书更加贴近工程实际。

本书由李宏仲、金义雄、王承民和段建民编著，由李宏仲统稿。本书承蒙东北电力大学校长李国庆教授主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的感谢。

本书参阅引用了不少前辈的工作成果，在此表示感谢。本书在编写过程中，上海电力学院的众多领导、专家给予了深切的关怀，编者的同事、家人与朋友均为本书的编写提供了众多的帮助，在此一并向他们致以衷心的感谢。

本书受到上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金（编号：sd110019）的资助，特此感谢！

限于编者水平，错漏之处难免，恳请读者对书中不妥之处予以批评指正。

编　者

2012年1月

目　录

前言
第 1 章　电力系统主设备电气参数计算 …… 1
1.1　电力线路的电气参数 …… 1
1.1.1　电力线路参数 …… 1
1.1.2　电力线路的等值电路 …… 4
1.2　电力变压器的电气参数 …… 5
1.2.1　双绕组变压器 …… 5
1.2.2　三绕组变压器 …… 6
1.2.3　等值变压器模型 …… 7
1.3　电力网络模型的反推计算 …… 7
参考文献 …… 11
第 2 章　无功功率的相关概念 …… 13
2.1　无功功率的定义 …… 13
2.2　无功功率的物理意义 …… 14
2.3　无功负荷和无功损耗 …… 15
参考文献 …… 18
第 3 章　电网损耗的计算 …… 19
3.1　电网损耗的构成 …… 19
3.1.1　统计线损率 …… 20
3.1.2　理论线损率 …… 20
3.2　电力网的电能损耗计算 …… 21
3.2.1　线路电能损耗计算方法 …… 21
3.2.2　变压器损耗计算 …… 25
3.2.3　变压器电能损耗 …… 30
3.3　电容器损耗 …… 31
3.4　电抗器损耗 …… 31
3.5　调相机损耗 …… 32
参考文献 …… 32
第 4 章　电能损耗计算及管理软件 …… 33
4.1　电能损耗计算分析软件 …… 33
4.2　电能损耗管理软件 …… 36
4.3　电能损耗软件同 GIS 的结合 …… 38
4.3.1　图形化操作界面 …… 38

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.3.2　电网自动建模 …… 39
4.3.3　计算数据采集 …… 39
4.3.4　理论线损计算 …… 40
4.3.5　实际线损统计 …… 40
4.3.6　线损分析 …… 41
4.3.7　自动生成报表 …… 41
4.3.8　模块化功能设计 …… 42
第5章　无功补偿设备 …… 43
5.1　无功补偿的基本概念和目的 …… 43
5.2　无功补偿装置技术的发展 …… 44
5.3　调压式无功补偿装置 …… 47
5.4　MCR 型无功补偿装置 …… 48
5.4.1　基本原理 …… 48
5.4.2　MCR 无功补偿基本结构 …… 49
5.5　SVC …… 50
5.5.1　SVC 的分类 …… 50
5.5.2　饱和电抗器 …… 51
5.5.3　晶闸管控制电抗器 …… 52
5.5.4　晶闸管投切电容器 …… 55
5.5.5　组合式 SVC …… 60
5.5.6　鞍山红一变 220kV-SVC 示范工程介绍 …… 62
5.6　STATCOM …… 65
5.6.1　系统构成 …… 65
5.6.2　工作原理 …… 65
5.6.3　STATCOM 与 SVC 比较 …… 68
5.6.4　朝阳变 20Mvar-STATCOM 示范工程介绍 …… 69
5.7　几种无功补偿装置比较 …… 73
参考文献 …… 75
第6章　电压调整与无功规划 …… 77
6.1　概述 …… 77
6.2　电压调整措施 …… 77
6.2.1　无功补偿调压 …… 77
6.2.2　有载调压变压器调压 …… 79
6.2.3　无功补偿和变压器综合调压 …… 82
6.2.4　其他电压控制措施 …… 82
6.2.5　中枢点的电压管理 …… 83
6.2.6　电压调整的复杂性 …… 83
6.2.7　有载分接头调整和电容器投切对高压侧电压的影响 …… 84

6.3 无功规划 …… 85
6.3.1 基本原则 …… 85
6.3.2 无功规划的基本流程 …… 86
6.4 无功规划的优化算法 …… 90
6.4.1 数学规划法 …… 91
6.4.2 现代启发式算法 …… 93
6.4.3 多目标无功规划 …… 100
6.5 无功规划存在的问题 …… 108
参考文献 …… 109
第7章 无功优化 …… 113
7.1 概述 …… 113
7.2 无功优化与无功规划的区别与联系 …… 114
7.3 静态无功优化 …… 115
7.3.1 经典数学模型 …… 115
7.3.2 无功优化算法 …… 118
7.4 动态无功优化法 …… 123
7.4.1 数学模型 …… 124
7.4.2 动态规划法 …… 125
参考文献 …… 130
第8章 配电网无功补偿实用方法 …… 132
8.1 配电网无功补偿形式 …… 134
8.2 配电网无功优化配置的成本函数 …… 136
8.2.1 投资成本 …… 137
8.2.2 运行成本 …… 137
8.3 集中—分布协调控制模式的容量优化匹配 …… 141
8.3.1 考虑经济性的并联电容器优化分组 …… 141
8.3.2 集中—分布协调控制模式的容量优化匹配 …… 145
8.4 求解方法 …… 146
参考文献 …… 149
第9章 地区电网电压无功自动控制 …… 151
9.1 电压无功自动控制的发展历程 …… 151
9.2 AVC 系统主要功能 …… 155
9.3 地区电网 AVC 控制策略发展 …… 155
9.4 系统构成 …… 157
9.5 灵敏度算法 …… 159
9.5.1 灵敏度矩阵 …… 160
9.5.2 变压器分接头的调整 …… 161
9.5.3 电容器组投切 …… 161

9.5.4　参数变化灵敏度矩阵 …… 162
9.5.5　优化计算 …… 162
9.6　地区电网 AVC 系统实施要求 …… 164
9.7　AVC 系统的关键技术 …… 166
9.7.1　状态估计 …… 166
9.7.2　实时数据库 …… 167
9.7.3　通信接口 …… 168
9.7.4　AVC 控制的闭锁与解锁 …… 169
9.7.5　图形化操作界面的维护 …… 170
9.7.6　并列变处理 …… 171
9.7.7　电容器循环投切 …… 172
9.7.8　专家系统的应用 …… 172
9.7.9　电压上下限的确定原则 …… 175
9.7.10　无功上下限的确定原则 …… 175
9.7.11　无功电压分层控制 …… 176
9.7.12　调控方案效果评估 …… 176
9.7.13　电厂侧自动电压控制系统 …… 176
第 10 章　电压无功集中—分布式协调控制 …… 178
10.1　无功负荷变化的特点 …… 178
10.2　电压无功控制装置的特点 …… 178
10.3　两级无功电压控制模式 …… 179
10.3.1　无功集中优化补偿原则 …… 180
10.3.2　基于日无功负荷预测的电容器投切容量的计算 …… 180

第 1 章　电力系统主设备电气参数计算

1.1　电力线路的电气参数

电力线路按结构可分为架空线路和电缆线路两大类别。

架空线路由导线、避雷线、绝缘子、杆塔和金具等构成。一般用绝缘子将输电导线固定在直立于地面的杆塔上，以传输电能。导线由导电良好的金属制成，有足够大的截面积（以保持适当的通流密度）和较大曲率半径（以减小电晕放电）。超高压输电则多采用分裂导线。避雷线（又称架空地线）设置于输电导线的上方，用于保护线路免遭雷击。重要的输电线路通常用两根架空地线。绝缘子串由单个悬式（或棒式）绝缘子串接而成，需满足绝缘强度和机械强度的要求。每串绝缘子个数由输电电压等级决定。杆塔多由钢材或钢筋混凝土制成，是架空输电线路的主要支撑结构。

架空输电线路在设计时要考虑它受到的气温变化、强风暴侵袭、雷闪、雨淋、结冰、洪水、湿雾等各种自然条件的影响，还要考虑电磁环境干扰问题。架空输电线路所经路径还要有足够的地面宽度和净空走廊。

电缆线路则由导线、绝缘层、包护层等构成。通常是由几根或几组导线每组至少两根绞合而成的类似绳索的电缆，每组导线之间相互绝缘，并常围绕着一根中心扭成，整个外面包有高度绝缘的绝缘覆盖层以及金属护套等包护层。

电缆线路的造价较架空线路高。电压愈高，两者差别愈大。电缆线路发生故障时，检修电缆线路费工费时。但电缆线路有其优点，如不需在地面上架设杆塔，占用土地面积少；供电可靠，极少受外力破坏；对人身较安全等。因此，在发电厂和变电所内部或附近以及穿过江河、海峡时，往往使用电缆线路。近几年随着城市供电网络架空线入地改造工程的逐步实施，电缆线路的应用越来越多。此外，电缆线路还在城市高架道路和大型桥梁的建设工程中大量使用。

1.1.1　电力线路参数

（1）电力线路的电阻

一般情况下，电力线路所采用的金属导线指铝线、钢芯铝线和铜线。它们每相单位长度的电阻可按下式计算

$$r = \frac{\rho}{S} \tag{1-1}$$

在电力系统计算中，导线材料的电阻率采用下列数值：铝为 31.5Ωmm²/km，铜为 18.8Ωmm²/km。由于存在趋肤效应和邻近效应，电力线路的交流电阻一般略大于直流电阻。实际应用中，导线的电阻通常从产品目录或手册中查得。但是手册中给出的是在 20℃下的数据，而实际电力线路的运行环境温度往往不是 20℃，因此在需要精确计算时，必须对所查得的数据按下式进行转换。

$$r = r_{20}\left[1 + a\left(t - 20\right)\right] \tag{1-2}$$

$$a = \begin{cases} 0.00360 & \text{铝导线} \\ 0.00382 & \text{铜导线} \end{cases}$$

（2）电力线路的电抗

电力线路的电抗计算较为复杂，分为单相、三相导线及分裂导线等多种情况，详细的计算过程请参考文献［3，4］中的相关内容。在实际计算中，可以采用下式做近似计算：

$$x = 0.1445\lg\frac{D_m}{r} + 0.0157 \tag{1-3}$$

式中　D_m——导线的几何均距；

　　r——导线半径。

D_m 与 r 的单位必须统一（采用 mm 或者 cm）。

也可以从相关的产品目录或手册中查得架空线路的单位长度电抗，但是必须注意架空线路的排列情况，在相同电压等级下，架空线路采用三相并行排列或品字形排列方式，其单位长度电抗值是不同的。如表 1-1 所示。

在近似计算的情况下，对于架空线路的单位长度电抗可以取 0.4Ω/km。

对于电缆线路的电抗参数一般情况下都需要通过查阅产品手册获取，尤其对于 110kV 及以上的高压输电电缆。

（3）电力线路的导纳

在实际计算中，电力线路的电纳可以采用下式进行计算：

$$b = \frac{7.58}{\lg\frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \tag{1-4}$$

式中　D_m——导线的几何均距；

　　r——导线半径。

同样的 D_m 与 r 的单位必须统一（采用 mm 或者 cm）。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

表 1-1　每公里架空线路的电抗、电阻标幺值(S^* = 100MVA)

导线型号	6kV				10kV				36kV				110kV			
	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*
LJ-16	0.404	1.028	1.96	4.938	0.404	0.367	1.96	1.778								
LJ-25	0.390	0.983	1.27	3.200	0.390	0.354	1.27	1.152								
LGJ. LJ-35	0.380	0.957	0.91	2.293	0.380	0.345	0.91	0.825	0.424	0.0310	0.91	0.0665				
LGJ. LJ-60	0.368	0.927	0.63	1.587	0.368	0.334	0.63	0.571	0.412	0.0310	0.63	0.0460	0.442	0.00334	0.63	0.00476
LGJ. LJ-70	0.358	0.902	0.45	1.134	0.358	0.325	0.45	0.403	0.402	0.294	0.45	0.0329	0.432	0.00327	0.45	0.00340
LGJ. LJ-95	0.342	0.862	0.33	0.831	0.342	0.310	0.33	0.299	0.386	0.282	0.33	0.0241	0.416	0.00315	0.33	0.00250
LGJ. LJ-120	0.335	0.844	0.27	0.680	0.335	0.304	0.27	0.245	0.379	0.277	0.27	0.0197	0.409	0.00309	0.27	0.00204
LGJ-150									0.373	0.272	0.21	0.0153	0.403	0.00305	0.21	0.00159
LGJ-185									0.365	0.267	0.17	0.0124	0.395	0.00299	0.17	0.00129
LGJ-240									0.358	0.262	0.13	0.0096	0.388	0.00293	0.13	0.00100
LGJQ-300													0.382	0.00289	0.11	0.00081
LGJQ-400													0.373	0.00282	0.08	0.00061

导线型号	220kV								330kV				500kV			
	单导线				双分裂				双分裂				三分裂			
	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*	X/Ω	X^*	r/Ω	r^*
LGJ-185	0.440	0.000832	0.170	0.000321	0.315	0.000595	0.085	0.000181								
LGJ-240	0.342	0.000817	0.132	0.000250	0.310	0.000586	0.066	0.000125								
LGJQ-300	0.427	0.000807	0.107	0.000202	0.308	0.000582	0.054	0.000102	0.321	0.000270	0.054	0.000045	0.302	0.000110	0.0360	0.0000131
LGJQ-400	0.417	0.000788	0.080	0.000151	0.303	0.000573	0.040	0.000076	0.316	0.000266	0.040	0.000034	0.299	0.000108	0.0266	0.000097
LGJQ-500	0.411	0.000777	0.065	0.000125	0.300	0.000567	0.033	0.000061	0.313	0.000268	0.033	0.000027	0.297	0.000108	0.0216	0.000078
LGJQ-600	0.405	0.000766	0.065	0.000104	0.297	0.000561	0.028	0.000052	0.310	0.000260	0.028	0.000023	0.295	0.000107	0.0183	0.000066
LGJQ-700	0.398	0.000752	0.044	0.000083	0.294	0.000556	0.022	0.000042	0.307	0.000258	0.022	0.000018	0.292	0.000106	0.0146	0.000053

输电线路参数按表 1-2 所列条件计算。

表 1-2　输电线路参数

电压/kV	6	10	35	110	220	330	500
线间距离/m	1.25	1.25	2.50	4.00	6.50	8.00	11.00
线分裂距离/cm					40	40	40
导线排列方式					··	··	∴

由于电纳同几何均距、导线半径之间存在对数关系，所以架空线路的电纳变换不大。在近似计算中，可以取单位长度的电纳值为 2.85×10^{-6}S/km。而对于分裂导线而言，其电纳值也可以采用式（1-4）计算，只需要将导线半径换成等效半径即可。

也可以直接从相关的手册中查得分裂导线的电纳值。例如可以利用图 1-1，根据不同的导线分裂根数、几何均距查询 500kV 分裂导线的单位长度电纳值。

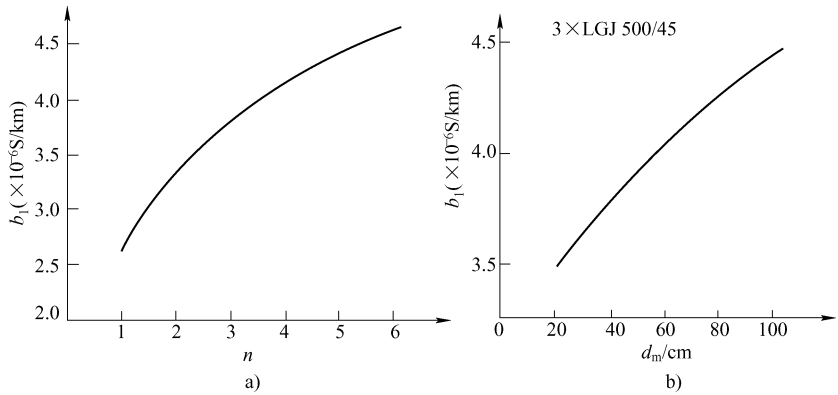

图 1-1　分裂导线电纳值

a）与分裂根数 n 的关系　b）与几何均距的关系 d_m

对于电缆线路来说，其电纳值一般需要通过查询产品手册获取，值得注意的是，由于电缆线路具有等效电容效应，其电纳值一般要比同电压等级的架空线路大一个数量级。

线路的电导取决于线路上安装的绝缘子串的泄漏和电晕，而与导线材料无关。实际上，由于泄漏通常很小，而在设计线路时，就已检验了所选导线内半径能否满足晴朗天气不发生电晕的要求，一般情况都可认为线路的电导为零。

1.1.2　电力线路的等值电路

在无功优化规划等电力系统稳态分析中，主要利用电力线路的电阻、电抗、电导、电纳来表示其等值电路，一般采用“π”形等值电路，如图 1-2 所示。

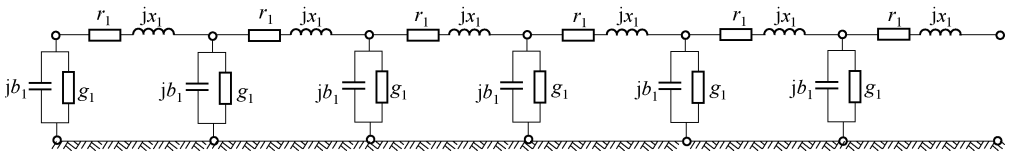

图 1-2　电力线路单相等值电路

在实际的计算过程中，对于长度在 100km 以下的短线路可做进一步简化，即忽略电导、电纳，只保留阻抗，如图 1-3 所示。

对于长度在 100～300km 的中等长度线路或者 100km 以下的电缆线路，采用如图 1-4 所示的等值电路。而长度在 300km 以上的长线路，理论上讲，应该考虑其分布参数特性，即在图 1-4 所示的等值电路基础上，对参数做分布参数特性调整，详细内容请参考参考文献［3］，本书中不再赘述。

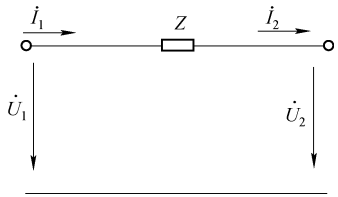

图 1-3　短线路等值电路

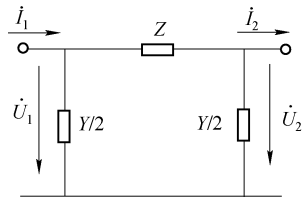

图 1-4　中等长度线路等值电路

1.2　电力变压器的电气参数

1.2.1　双绕组变压器

在实际计算中，一般变压器的阻抗和导纳值利用其铭牌参数直接计算，如式（1-5）～式（1-8）所示。

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} \tag{1-5}$$

式中　R_T——变压器高低压绕组电阻（Ω）；

P_k——变压器短路损耗（kW）；

U_N——变压器额定电压（kV）；

S_N——变压器额定容量（MVA）。

$$X_T \approx \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \times \frac{U_k\%}{100} = \frac{U_k\% U_N^2}{100 S_N} \tag{1-6}$$

式中　X_T——变压器高低压绕组电抗（Ω）；

$U_k\%$——变压器的短路电压百分数。

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} \tag{1-7}$$

式中　G_T——变压器的电导（S）；

P_0——变压器空载损耗（kW）。

$$B_T = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_N^2} \tag{1-8}$$

式中　B_T——变压器电纳（S）；

$I_0\%$——变压器空载电流百分数。

双绕组变压器的等值模型一般采用 Γ 形等值电路，且励磁支路接在电源侧，如图 1-5 所示。

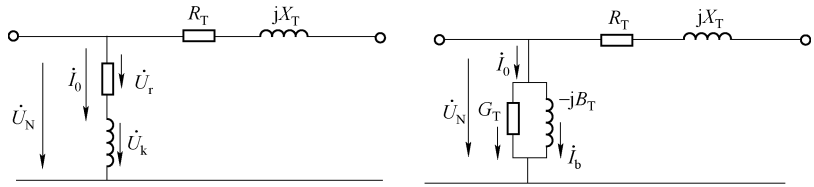

图 1-5　双绕组变压器等值电路

a）励磁支路以阻抗表示　b）励磁支路以导纳表示

1.2.2　三绕组变压器

1. 电阻

三绕组变压器的参数计算思路上同双绕组的计算是相同的，只是由于三绕组变压器各绕组的额定容量比有所不同，而且升压变和降压变中高、中、低压三侧绕组的排列方式也不一样，所以需要做一些调整。目前，三绕组变压器的铭牌所给出的短路损耗是指最大短路损耗 $P_{k.\max}$，即两个 100% 容量绕组中流过额定电流，另一个 100% 或 50% 容量绕组空载时的损耗。由 $P_{k.\max}$ 可求得两个 100% 容量绕组的电阻。然后根据“同一电流密度选择各绕组导线截面积”的变压器设计原则，可得另一个 100%，理论上等于这两个绕组之一的电阻；或另一个 50% 容量绕组的电阻，理论上等于这两个绕组之一电阻的两倍。计算公式如式（1-9）所示。

$$\begin{cases} R_{T(100\%)} = \dfrac{P_{k.\max} U_N^2}{2000 S_N^2} \\ R_{T(50\%)} = 2R_{T(100\%)} \end{cases} \tag{1-9}$$

2. 电抗

三绕组变压器按其 3 个绕组排列方式的不同有两种不同结构——升压结构和降压结构。升压结构变压器的中压绕组最靠近铁心，低压绕组居中，高压绕组在最外层。降压结构变压器的低压绕组最靠近铁心，中压绕组居中，高压绕组仍在最外层。但是这两种结构的变压器电抗计算方法是相同的，首先求出各绕组的短路电压，再按照双绕组的计算公式计算电抗即可。

$$\begin{cases} U_{k1}\% = (U_{k(1-2)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(2-3)}\%)/2 \\ U_{k2}\% = (U_{k(1-2)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(3-1)}\%)/2 \\ U_{k3}\% = (U_{k(2-3)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(1-2)}\%)/2 \end{cases} \tag{1-10}$$

$$\begin{cases} X_{T1}=\dfrac{U_{k1}\%\,U_N^2}{100S_N} \\ X_{T2}=\dfrac{U_{k2}\%\,U_N^2}{100S_N} \\ X_{T3}=\dfrac{U_{k3}\%\,U_N^2}{100S_N} \end{cases} \tag{1-11}$$

3. 导纳

三绕组变压器导纳的求取方法与双绕组变压器的相同。

1.2.3　等值变压器模型

利用变压器模型、线路模型和负荷模型即可搭建电力网络模型。而在搭建电力模型，尤其用于计算机编程计算的模型时，就需要使用等值变压器模型。所谓等值变压器模型指的是在变压器阻抗 Z_T 的左侧串联一个电压比为 k 的理想变压器，如图 1-6 所示。观察图 1-6 可以发现，这种变压器模型的参数确实与电压比 k 有关，表明这种模型确实体现了变压器改变电压大小的功能。但也可见，这种等值电路中的 3 个支路并无物理意义可言，不同于变压器的 Γ 形或 T 形等值电路中，接地支路代表励磁导纳而串联阻抗支路代表绕组电阻和漏抗。这是这种变压器模型的另一特点。正由于这一特点，称之为等值变压器模型。

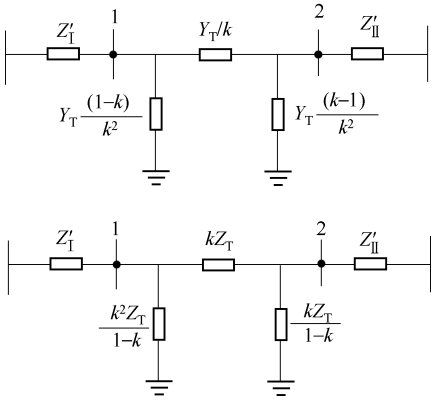

图 1-6　等值双绕组变压器模型

至于等值变压器模型的具体应用方法，请参考参考文献［3］中相关内容。

而所谓“标准电压比”，在采用有名制时，是指归算参数时所取的电压比，在采用标幺制时，则指折算参数时所取各基准电压之比。而所谓“非标准电压比”就统指与这两种情况相对应的理想变压器电压比。

三绕组变压器的等值模型思路同双绕组的类似。一般来说，理想变压器都串联在高压或高压和中压绕组端点，不串联在低压绕组端点；相应地，变压器本身的阻抗则都先按低压绕组电压求得其有名值，然后再进行归算或折算。

1.3　电力网络模型的反推计算

在实际的电力系统分析计算中，从现场获取的往往都是设备铭牌参数或者设备

型号，比如变压器的型号和铭牌参数、线路的型号和长度等，需要做进一步的计算才能得到建立网络模型所需的阻抗和导纳数据。但是以这种方式获得的参数与实际电力系统的设备参数值往往存在一定的差异。在实际计算过程，如果利用其进行潮流计算或者无功优化计算，计算结果会产生一定的误差。

导致计算获取的参数值与实际值之间误差的原因通常为：

1）有时因缺少实测参数量而直接采用设计参数，或者参数测量条件与实际运行条件差别较大，这都会使给定的参数值与实际运行中的元件参数有差别。

以线路参数为例，如前所述，通常情况下，现场提供的是线路型号和长度，然后根据相关公式计算线路的阻抗等参数。而参数计算同线路的敷设情况是相关的，但是线路的敷设情况在实际计算过程中是难以全面收集的，因此，大多数情况下是以某一假想的理想情况来计算的，这就使得所计算获取的线路参数同实际的参数存在差别。

又如无功补偿设备，以并联电容为例，在计算过程中往往直接利用电容的额定值进行计算。而实际电力系统中，电容所发出的无功功率值是电压的函数，其所补偿的无功功率是随着系统的电压水平而变化的。这必然会引起一定的计算误差。

2）实际运行中的元件参数因改线、改建，或因环境变化等原因而局部地、缓慢地发生着变化。

仍以变压器参数为例，如前所述，在计算其参数时，一般都利用铭牌数据计算其阻抗/导纳参数。而随着变压器运行时间的增长，相关参数必然会发生缓慢变化，此时，如果仍然利用铭牌数据换算参数将必然造成计算参数的误差。例如，同样型号的变压器，在其使用 5～10 年以后，对应的电气参数同刚出厂时相比必然是会有所不同的。

3）调度中心对运行中的自动调压变压器的分接头位置或补偿电容器的组数掌握得不一定确切。特别是输电线路，一般给定的参数值是在理想情况下的，但是由于温度等原因，线路实际情况与理想情况有时相差很大，因此，一般给定的线路参数值和实际值相比大约有 25%～30% 的误差。

错误的参数值会造成以下一些结果：

1）参数错误对所包含错误支路参数的状态估计量值产生较大的误差，从而影响其他一些应用，如安全分析等；

2）一些在正常范围内的测量值因与网络参数不一致而被检测成坏数据；

3）长期的误差使运行部门对状态估计的结果失去信心；

4）直接使用给定的参数值减弱了状态估计检测和辨识坏数据的能力；

因此，电力网络参数估计在电力系统分析中得到越来越多的关注，与状态估计和拓扑估计一样变得重要。电力网络参数估计大致可以分为以下两种方法：

1）基于残差和量测误差之间关系的灵敏度分析，这种基于灵敏度分析的状态

需要全本请访问 www.ertongbook.com