

地区降压变电所二次部分设计低频减载仿真

摘 要

本文针对变电所主变压器的二次部分设计，以数字式继电保护为基本出发点进行以下了内容的设计。根据电力系统与变电所主变的特点，作者对短路电流进行计算，选择合适型号的保护装置，从而进行各种整定计算，并分析计算结果的合理性以给出继电保护装置的参数与定值。使得主变保护的选择性、灵敏性和可靠性满足要求，使继电保护装置充分发挥作用，保证电力系统的稳定运行。

利用 `matlab` 软件对低频减载仿真建模，建立的模型由离散三相相同步测量模块、继电器模块、三相断路器模块等构成，仿真了当频率降低到某一定值时自动切除相应负荷的这一过程，分析了该模型里各个电气量在仿真过程里的变化程度与特点，总结各电气量的特性，从而得出仿真是可行与正确的。

关键词 变电所，二次部分设计，`matlab`，低频减载

Abstract

This paper is aimed at the main transformer of substation of the design of second part, and had done the following design which is based on the digital protection as a starting point. According to the power system and the main transformer of substation features, the author made the calculation of short-circuit current, chose a suitable model of the protection device, thus made the calculation for various setting, and analyzed whether the calculation results was reasonable so that to confirm the parameters and values for the device of relaying protection. To make the selectivity, sensitivity and reliability of relaying protection of main transformer meet the requirements, so that the relaying protection device could make full of its effects and guarantees the stability of the power system operation.

Using matlab software for UFLS(Under-Frequency Load Shedding) simulation modeling, the model made up of discrete 3-phase PLL(phase Locked Loop) block measurement block, relay block, three-phase circuit breaker block etc, had realized the simulation of the process of shedding the corresponding load automatically when the frequency fell to a certain value. The author had analyzed changes in the extent and trait of each electric element of this model during the process of simulation and summarized the characteristics of each electricity element, thus to make sure the simulation is feasible and correct.

Key Words substation, the design of second part, matlab, Under-Frequency Load Shedding

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
1 绪论.....	- 1 -
2 220kV 降压变电所的基本知识	- 2 -
2.1 变电所的作用	- 2 -
2.2 电气主接线的设计	- 2 -
2.3 总结.....	- 3 -
3 变压器运行的安全与继电保护	- 4 -
3.1 变压器运行的安全	- 4 -
3.2 继电保护的基本知识	- 4 -
3.3 变压器的继电保护装置运行整定规程	- 5 -
4 220kV 变电所主变二次设计	- 6 -
4.1 变电所一次接线及系统运行方式的说明	- 6 -
4.2 短路阻抗与短路电流的计算	- 7 -
4.3 电力变压器保护的配置	- 9 -
4.4 电力变压器保护整定计算	- 13 -
5 低频减载的 matlab 软件仿真	- 23 -
5.1 matlab 软件的基本认识	- 23 -
5.2 设计中使用的模块	- 24 -
5.3 低频减载仿真模型概述	- 25 -
5.4 仿真模块参数设置及其作用	- 27 -
5.5 仿真结果	- 40 -
6 结论	- 43 -
致谢	- 44 -
参考文献	- 44 -
附录 1：外文资料翻译	- 46 -
A1.1 负荷潮流分析	- 46 -
A1.2 Load Flow Analysis	- 49 -
附录 2：短路计算	- 55 -
A2.1 短路阻抗计算	- 55 -
A2.2 短路电流计算	- 78 -

1 绪论

变电所二次部分的设计对于实现变电所安全，优质和经济地生产以及电能的输配都具有极为重要的作用，随着变电所电压等级的提高，电气控制的自动化程度越来越高，对二次部分的设计水平提出了更高的要求。改革开放以来，电力建设飞速发展，随着电力技术的发展，特别是自动化技术的发展，传统的手动控制正逐渐被自动控制所替代，大量的继电保护及自动装置采用微机型装置，变电站综合自动化系统在电力系统中已被广泛应用。

因此，本次毕业设计将以上内容与原则作指导，进行变电所主变的二次部分设计，力求做到标准性与先进性并存。对待设计的变电所将以微机自动化原则为核心指导，并以微机型继电保护为基本出发点进行以下内容的设计：

根据电力系统与变电所主变的特点，运用所学到知识进行短路电流计算和各种整定计算。从而确定继电保护和自动装置的参数并给出定值，从而选择合适型号的保护装置，以求在配置和整定值上满足对主变保护选择性、灵敏性和可靠性要求，使继电保护装置充分发挥作用，保障电气设备的安全，保证电力系统的稳定运行。

电力系统在运行中，失去频率稳定性的后果是系统发生频率崩溃，引起系统全停电，事实证明这是值得我们继保人员深思的。因此要保证低频减载装置正常动作，维持频率稳定，确保电力系统有功功率供需平衡，这都是具有极其重要深刻意义的^{[8][9]}。由于系统运行方式多变，发生有功缺额的大小及实际可供切除的负荷量的大小都具有随机性，而且系统负荷特性具有未知性，这使合理设计减载动作方案具有较高的难度。因此对低频减载进行仿真实验是十分有工程实践意义的，故这次的毕业设计将采用 matlab 软件进行低频减载仿真研究。

具体的内容有电力系统的建模，低频减载装置的建模，观察并详细分析低频减载装置动作前后系统频率变化的情况及对有功功率与无功功率的影响，有关负荷的变化情况。分析影响低频减载正确动作的因素及在动作过程中存在的不稳定因素；最后分析在仿真设计与研究中存在的问题，发现和改正在其中的各种错误，确定仿真的正确与否及其适应性。

本次的对低频减载动作仿真，利用 MATLAB 的程序可对各种电气量画图，使用了 SimuLink 和 SimPowerSystems 工具箱建立正确的系统模型，从而运行仿真程序，根据示波器的波形能分析出电力系统的特点，装置的动作情况以及断路器的动作情况，从而使各电气量变化过程和装置的动作过程能够很清晰地展现在我们眼前。

2 220kV 降压变电所的基本知识

2.1 变电所的作用

电力系统由发电厂、变电站、线路和用户组成。变电站是联系发电厂和用户的中间环节，起着变换和分配电能的作用。220kV 降压变电所根据它在系统中的地位，属于中间变电站，他的高压侧以交换潮流为主，起系统交换功率的作用，或使长距离输电线路分段，一般汇集 2~3 个电源，电压为 220~330kV，同时又降压供给当地用电，这样的变电站主要起中间环节的作用。全站停电后，将引起区域电网解列^{[3][4]}。

2.2 电气主接线的设计

电气主接线是发电厂、变电站电气设计的首要部分，也是构成电力系统的首要环节。主接线的确定对电力系统整体及发电厂、变电站本身运行的可靠性、灵活性和经济性密切相关，并且对电气设备的选择、配电装置的布置、继电保护和控制方式的拟定有较大的影响。因此，必须正确处理好各方面的关系，全面分析有关影响因素，通过技术经济比较，合理地确定主接线方案。

2.2.1 主接线设计的基本要求

电气主接线是由高压电器通过连接线、按其功能要求组成接受和分配电能的电路，成为传输强电流、高电压的网络。电气主接线应满足可靠性、灵活性和经济性三项基本要求。

2.2.2 双母线接线特点（参见设计的电气主接线图）

220KV 变电所在高压系统中一般担负重新分配负荷、输送功率等多重任务。目前我国 220KV 变电所电气主接线一般采用高压侧双母线带旁路和断路器的接线方式，中压侧采用双母分段接线。双母线接线方式的运行优点日渐凸现，所以，现在用双母线接线方式的居多。有以下主要运行方式^[5]：

- (1) 正常运行方式。两组母线同时运行，所有断路器和隔离开关均合上；

-
- (2) 两组母线分裂运行方式，母联断路器断开；
 - (3) 一组母线工作，另一组母线备用的运行方式。

实际运行中多采用第一种方式，因母线故障时可缩小停电范围，且两组母线可以调配。供电可靠。

双母线接线方式供电可靠性表现为：

- (1) 检修任一母线时，可以利用母联把该母线上的全部回路倒换到另一组母线上，不会中断供电。这是在进、出线带负荷的情况下倒换操作，俗称“热倒”，对各回路的母线隔离开关是“先合后拉”。
- (2) 检修任一回路的母线隔离开关时，只需停该回路及与该隔离开关相连的母线。
- (3) 任一母线故障时，可将所有连于该母线上的线路和电源倒换到正常母线上，使装置迅速恢复工作。这是在故障母线的进、出线没有负荷的情况下倒换操作，俗称“冷倒”，对各回路的母线隔离开关是“先拉后合”，否则故障会转移到正常母线上。扩建方便，可向母线的任一端扩建。

双母线接线方式可以完成一些特殊功能。例如不，必要时，可利用母联断路器与系统并列或解列；当某个回路需要独立工作或进行试验时，可将该回路单独接到一组母线上进行；当线路需要利用短路方式熔冰时，亦可腾出一组母线作为熔冰母线，不致影响其他回路；当任一断路器有故障而拒绝动作或不允许操作时，可将该回路单独接于一组母线上，然后用母联断路器代替其断开电路。

2.3 总结

日前，随着我国经济的高速发展，电力工业正前瞻性的朝着大电网、大容量和高电压的方向发展。全国联网工程不断健康向前推进，各大电力系统之间互有联系，输送的功率越来越大。现全国联网装机容量超过 1.4 亿千瓦，如此大的装机容量，在客观上要求它需要一个稳定的运行环境。若电网瓦解和大面积停电事故，不仅会造成重大经济损失，影响人民生活和社会稳定并可能会影响到国家的安全问题。美、加大停电就很好的给我们敲响了警钟，是活教材。因此,变电站的安全稳定运行,尤其是高压等级的变电站对人们的生活起着至关重要的作用。

3 变压器运行的安全与继电保护

3.1 变压器运行的安全

3.1.1 变压器保护措施与故障损坏

电力变压器的故障分为内部和外部两种故障。内部故障指变压器油箱里面发生的各种故障，主要靠瓦斯和差动保护动作切除变压器；外部故障指油箱外部绝缘套管及其引出线上发生的各种故障，一般情况下由差动保护动作切除变压器。速动保护（瓦斯和差动）无延时动作切除故障变压器，设备是否损坏主要取决于变压器的动稳定性。而在变压器各侧母线及其相连间隔的引出设备故障时，若故障设备未配保护（如低压侧母线保护）或保护拒动时，则只能靠变压器后备保护动作跳开相应开关使变压器脱离故障。因后备保护带延时动作，所以变压器要承受一定时间段内的区外故障造成的过电流，在此时间段内变压器是否损坏主要取决于变压器的热稳定性。因此，变压器后备保护的定值整定与变压器自身的热稳定性在一定程度上也决定着变压器的安全运行。

3.1.2 220 kV 及以下变压器保护简介

220kV 变压器多为三相式三卷变压器，按技术规程要求，一般装设瓦斯保护、差动保护，同时在其高、中压侧均装设了复合电压闭锁过流保护及零序方向过电流保护与间隙保护，低压侧装设复合电压闭锁过流保护。各侧复合电压闭锁过流保护及零序方向过电流保护综合，可以反应变压器内部、各侧母线及母线邻近的电气设备的接地与相间故障，作为变压器自身主保护及各侧母线及母线邻近的电气设备的后备保护。110 kV 及以下变压器一般装设瓦斯保护（对油浸式变压器）、差动保护，110 kV 侧零序过电流保护、间隙保护及各侧过流保护或复合电压闭锁过流保护，这些保护的作用与 220 kV 变压器的作用相似^{[1][4]}。

3.2 继电保护的基本知识

3.2.1 电力系统故障

电力系统可能发生的故障类型比较多，常见的，对电力系统危害比较严重的有：

短路,断相以及各种复杂故障等。而短路故障则是电力系统中危害最严重的故障,一旦出现短路故障,就会伴随其产生三大特点:电流将急剧增大、电压将急剧下降、电压与电流之间的相位角将发生变化。

3.2.2 继电保护的概念

继电保护装置,就是指能反应电力系统中电气元件发生故障或不正常运行状态,并动作于断路器跳闸或发出信号的一种装置。它的基本任务是:

- (1) 自动,迅速,有选择地将故障元件从电力系统中切除,使故障元件免于遭到破坏,保证其它无故障部分迅速恢复正常运行;
- (2) 反应电气元件的不正常运行状态,并根据运行维护的条件,而动作于发出信号,减负荷跳闸。此时一般不要求保护迅速动作,而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时,以免不必要的动作和由于干扰而引起的误动作。

3.3 变压器的继电保护装置运行整定规程

《220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程》中要求[3]:

变压器各侧的过电流保护均按躲变压器额定负荷整定,但不作为短路保护的一级参与选择性配合,其动作时间应大于所有出线保护的最长时间。

变压器短路故障后备保护应主要作为相邻元件及变压器内部故障的后备保护。主电源侧的变压器相间短路后备保护主要作为变压器内部故障的后备保护。其它各侧的后备保护主要作为本侧引线、本侧母线和相邻线路的后备保护,并尽可能当变压器内部故障时起后备作用。以较短时限动作于缩小故障影响范围,以较长时限动作于断开变压器各侧断路器。

主电网间联络变压器的短路故障后备保护整定:高(中)压侧(主电源侧)相间短路后备保护动作方向可指向变压器,作为变压器高(中)压侧绕组及对侧母线相间短路故障的后备保护,并对中(高)压侧母线故障有足够的灵敏度,灵敏系数大于 1.5;如采用阻抗保护作为后备保护,且不装设振荡闭锁回路,则其动作时间应躲过系统振荡周期,其反方向偏移阻抗部分作为本侧母线故障的后备保护。

供电变电所降压变压器的短路故障后备保护整定:高压侧(主电源侧)相间短路后备保护动作方向指向变压器,对中压侧母线故障有足够灵敏

4 220kV 变电所主变二次设计

4.1 变电所一次接线及系统运行方式的说明

4.1.1 变电所一次接线

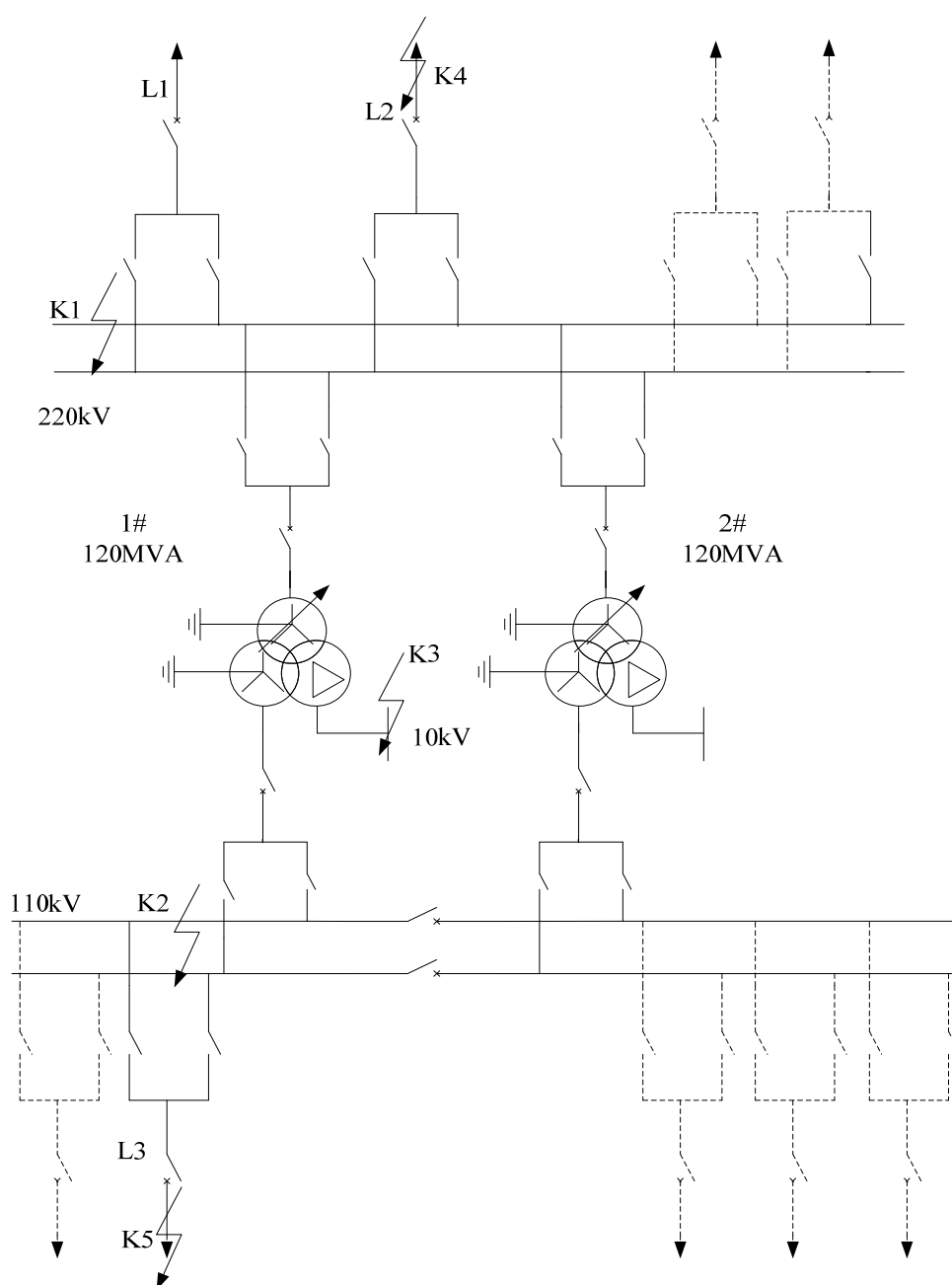


图 4.1 220kV 降压变电所一次接线示意图

该变电所为 220/121/10.5 三级电压，所内装设 120MVA 主变两台，220kV 侧采用双母接线，110kV 侧考虑到所接的负荷较多，也为以后的扩建方便，故采用双母四分段接线；实线出线所接为供电系统，虚线出线所接为负荷^[5]。

4.1.2 系统运行方式

对 220kV 母线故障，考虑两条进线同时运行的情况计算最大三相短路电流及两相短路电流；对于 110kV 母线故障，因为不考虑两台主变长期并列运行，所以按分列运行情况进行计算，计算最大三相短路电流及两相短路电流；对于 10kV 母线故障，因为不考虑两台主变长期并列运行，所以按分列运行情况进行计算，计算最大三相短路电流及两相短路电流^[2]。

4.2 短路阻抗与短路电流的计算

4.2.1 有关短路点及短路形式的选择

如图 4.1 所示，选择变压器三侧母线 K_1, K_2, K_3 为短路点^[3]，分别计算三相短路、两相短路及接地短路故障时短路点的电气量及保护安装处的与继电保护整定有关电气量；选择线路 L_2, L_5 末端为短路点，计算零序接地电流，为将要进行的主变后备保护的零序过流保护整定作准备^[6]。

4.2.2 短路计算结果

4.2.2.1 短路阻抗标么值

表 4.1 各短路点的各序阻抗标么值

序别	系统运行方式	短路点	电抗编号	标么值
正序	最大运行方式	K1	$X_{1.K1.\Sigma\max}$	$X_{1.K1.\Sigma\max}=0.62$
		K2	$X_{1.K2.\Sigma\max}$	$X_{1.K2.\Sigma\max}=1.51$
		K3	$X_{1.K3.\Sigma\max}$	$X_{1.K3.\Sigma\max}=2.26$
		K4	$X_{1.K4.\Sigma\max}$	$X_{1.K4.\Sigma\max}=0.56$
		K5	$X_{1.K5.\Sigma\max}$	$X_{1.K5.\Sigma\max}=2.19$

	最小运行方式	K1	$X_{1,K1,\Sigma\min}$	$X_{1,K1,\Sigma\min}=0.80$
		K2	$X_{1,K2,\Sigma\min}$	$X_{1,K2,\Sigma\min}=1.78$
		K3	$X_{1,K3,\Sigma\min}$	$X_{1,K3,\Sigma\min}=2.53$
		K4	$X_{1,K4,\Sigma\min}$	$X_{1,K4,\Sigma\min}=0.77$
		K5	$X_{1,K5,\Sigma\min}$	$X_{1,K5,\Sigma\min}=2.7$
零序	最大运行方式	K1	$X_{0,K1,\Sigma\max}$	$X_{0,K1,\Sigma\max}=0.54$
		K2	$X_{0,K2,\Sigma\max}$	$X_{0,K2,\Sigma\max}=0.53$
		K4	$X_{0,K4,\Sigma\max}$	$X_{0,K4,\Sigma\max}=2.49$
		K5	$X_{0,K5,\Sigma\max}$	$X_{0,K5,\Sigma\max}=6.71$
	最小运行方式	K1	$X_{0,K1,\Sigma\min}$	$X_{0,K1,\Sigma\min}=0.61$
		K2	$X_{0,K2,\Sigma\min}$	$X_{0,K2,\Sigma\min}=0.58$
		K4	$X_{0,K4,\Sigma\min}$	$X_{0,K4,\Sigma\min}=2.51$
		K5	$X_{0,K5,\Sigma\min}$	$X_{0,K5,\Sigma\min}=6.79$

4.2.2.1 短路电流有名值

表 4.2 短路电流计算表

故障点	系统运行方式	短路类型	短路电流/A
K_1	最大运行方式	三相短路	4048
		两相短路	3506
		两相接地短路	4429
		单相接地短路	4230
	最小运行方式	三相短路	3727
		两相短路	2717
		两相接地短路	3728
		单相接地短路	3507
K_2	最大运行方式	三相短路	3476
		两相短路	3010
		两相接地短路	6127
		单相接地短路	4435
	最小运行方式	三相短路	2949
		两相短路	2553

		两相接地短路	5356
		单相接地短路	3803
K ₃	最大运行方式	三相短路	7299
		两相短路	6321
	最小运行方式	三相短路	6520
		两相短路	5647
K ₄	最大运行方式	单相接地短路	2016
		两相接地短路	1359
	最小运行方式	单相接地短路	1859
		两相接地短路	1301
K ₅	最大运行方式	单相接地短路	1420
		两相接地短路	1009
	最小运行方式	单相接地短路	1292
		两相接地短路	967

4.3 电力变压器保护的配置

4.3.1 保护选型

4.3.1.1 保护选型 （1）根据江苏电网继电保护配置选型原则（变压器保护配置选型原则）：

a).对于 220kV 主变压器的微机保护按反措第 13.6 点要求必须双重化。主变压器应采用两套完整、独立的主保护和两套配置完整的后备保护，同时还必须保证两套主、后备保护在交、直流回路上的独立性。正常运行方式下，两套独立的主保护宜同时投入。两套独立的主保护宜分别接在独立电流互感器两个次级绕组，但第二套主保护也可以设计在独立电流互感器和主变套管电流互感器间进行切换，当旁路断路器代主变断路器运行时，第一套主保护应相应切到旁路断路器的电流互感器。第二套主保护及相应的后备保护可以停用。

b).在实际使用中可根据电网实际运行情况，除去非电量（气体）保护必须投跳外，应选择合理、可靠的主变保护运行方式。220kV 及以上电压等级的重要的变压器保护，各侧的过电流保护均按躲变压器额定负荷整定，但不作为短路保护的一级参与选择性配合，其动作时间应大于所有出线保护的最长时间；中性点直接接地的变压器各侧零序电流最末一段，不带方向按与线路零序电流保护最末一

段配合整定。上述保护动作后均跳开变压器的各侧断路器。

c).变压器保护配置选型应积极慎重，除技术先进、运行维护方便、良好的售后服务外，应特别强调其安全性。

（2）变压器保护选型确定：

变压器保护选用南瑞继保公司的RSC-978JS型变压器成套保护装置。RCS-978系列数字式变压器保护适用于220kV 及以上电压等级，需要提供双套主保护、双套后备保护的各种接线方式的变压器。

4.3.1.2 保护性能特征：

- (1) 高性能的硬件、实时计算：采用 32 位微处理器 + 双 DSP 的硬件结构，三个 CPU 并行工作，32 位微处理器负责出口逻辑，两个 DSP 负责保护运算。高性能的硬件保证了装置在每一个采样间隔对所有继电器进行实时计算。
- (2) 独立的起动元件：启动 + 保护动作出口跳闸方式，杜绝保护装置硬件故障引起的误动。
- (3) 强电磁兼容性：整体面板、全封闭机箱，强弱电严格分开，取消传统背板配线方式，同时在软件设计上采取相应的抗干扰措施，装置的抗干扰能力大大提高，对外的电磁辐射也满足相关标准。
- (4) 双主、双后备保护的配置原则：真正实现一台装置完成所有的主保护、后备保护功能。
- (5) 程序模块化：模块化的程序使保护配置灵活，功能调整方便。
- (6) 独特的差动二次电流相位调整方法：采用 $\Delta \rightarrow Y$ 变换调整变压器各侧 TA 二次电流相位，因此故障相、非故障相具有名特征，励磁涌流闭锁判据可以实现分相制动。
- (7) 可选的励磁涌流判别原理：提供了二次谐波原理和波形识别原理两种方法识别励磁涌流，可经整定选择使用任一种原理，或同时使用两种原理。
- (8) 高灵敏度的工频变化量差动保护：利用工频故障分量构成的工频变化量比率差动保护，不受负荷电流影响，灵敏度高，抗 TA 饱和能力强。
- (9) 可靠比例差动保护：采用初始带制动的比例差动特性，并有 TA 饱和判据。

4.3.2 保护配置：

4.3.2.1 配置原则 遵照《继电保护和自动装置技术规程》[中华人民共和国行业标

DL 400-91]中的以下具体内容进行配置:

对变压器引出线、套管及内部的短路故障,应按下列规定,装设相应的保护作为主保护。保护瞬时动作于断开变压器的各侧断路器。

对 6.3MVA 及以上厂用工作变压器和并列运行的变压器。10MVA 及以上厂用备用变压器和单独运行的变压器,以及 2MVA 及以上用电流速断保护灵敏性不符合要求的变压器,应装设纵联差动保护。

纵联差动保护应符合下列要求:

- a.应能躲过励磁涌流和外部短路产生的不平衡电流。
- b.应在变压器过励磁时不误动。
- c.差动保护范围应包括变压器套管及其引出线。

对由外部相间短路引起的变压器过电流,应按下列规定装设相应的保护作为后备保护。保护动作后,应带时限动作于跳闸。

a.过电流保护宜用于降压变压器,保护的整定值应考虑事故时可能出现的过负荷。

b.复合电压(包括负序电压及线电压)起动的过电流保护,宜用于升压变压器、系统联络变压器和过电流保护不符合灵敏性要求的降压变压器。

c.负序电流和单相式低电压起动的过电流保护,可用于 63MVA 及以上升压变压器。

外部相间短路保护应装于变压器下列各侧,各项保护的接线,宜考虑能反应电流互感器与断路器之间的故障。

a.三绕组变压器和自耦变压器,宜装于主电源侧及主负荷侧。主电源侧的保护应带两段时限,以较短的时限断开未装保护侧的断路器。当上述方式不符合灵敏性要求时,可在所有各侧均装设保护,各侧保护应根据选择性的要求装设方向元件。

b.低压侧有分支,并接至分开运行母线段的降压变压器。除在电源侧装设保护外,还应在每个支路装设保护。

多绕组变压器的外部相间短路保护,根据其型式及接线的不同,可按下述原则进行简化。

a.220kV 及以下三相多绕组变压器,除主电源侧外,其他各侧保护可仅作本侧相邻电力设备和线路的后备保护。

b.保护对母线的各类故障应符合灵敏性要求。保护作为相邻线路的远后备时,可适当降低对保护灵敏系数的要求。

c.110kV 及以上中性点直接接地的电力网中,如变压器的中性点直接接地运

行，对外部单相接地引起的过电流，应装设零序电流保护。零序电流保护可由两段组成。

d.110kV、220kV 中性点直接接地的变压器，每段可各带两个时限，并均以较短的时限动作于缩小故障影响范围，或动作于本侧断路器；以较长的时限动作于断开变压器各侧断路器。

双绕组及三绕组变压器的零序电流保护，应接到中性点引出线上的电流互感器上，零序电流方向保护也可接入高、中压侧电流互感器的零序回路。

10kV、220kV 中性点直接接地的电力网中，如低压侧有电源的变压器中性点可能接地运行或不接地运行时，则对外部单相接地引起的过电流，以及对因失去接地中性点引起的电压升高，应按下列规定装设保护。

0.4MVA 及以上变压器，当数台并列运行或单独运行，并作为其他负荷的备用电源时，应根据可能过负荷的情况，装设过负荷保护。对自耦变压器和多绕组变压器，保护应能反应公共绕组及各侧过负荷的情况。过负荷保护采用单相式，带时限动作于信号。在无经常值班人员的变电所，必要时，过负荷保护可动作于跳闸或断开部分负荷。

4.3.2.2 配置内容 RCS—978 装置中可提供一台变压器所需要的全部电量保护，主保护和后备保护可共用同一 TA。配置的这些保护包括：

- a) 稳态比率差动；
- b) 差动速断；
- c) 工频变化量比率差动；
- d) 零序比率差动；
- e) 复合电压闭锁方向过流；
- f) 零序方向过流；
- g) 零序过压；
- h) 间隙零序过流。

另外还包括以下异常告警功能：

- a) 过负荷报警；
- b) 起动冷却器；
- c) 过载闭锁有载调压；
- d) 零序电压报警；
- e) 公共绕组零序电流报警；
- f) 差流异常报警；
- g) 零序差流异常报警；

-
- h) 差动回路 TA 断线;
 - i) TA 异常报警和 TV 异常报警。

4.4 电力变压器保护整定计算

4.4.1 差动保护整定计算

4.4.1.1 比率差动

(1)装置中的平衡系数的计算

- a). 计算变压器各侧一次额定电流:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1n}} \quad (4.1)$$

式中 S_n ——变压器最大额定容量;
 U_{1n} ——变压器计算侧额定电压。

- b). 计算变压器各侧二次额定电流:

$$I_{2n} = \frac{I_{1n}}{n_{LH}} \quad (4.2)$$

式中 I_{1n} ——变压器计算侧一次额定电流;
 n_{LH} ——变压器计算侧 TA 变比。

- c). 计算变压器各侧平衡系数:

$$\begin{cases} K_b = \min\left(\frac{I_{2n_max}}{I_{2n_min}}, 4\right) \\ K_{ph} = \frac{I_{2n_min}}{I_{2n}} \times K_b \end{cases} \quad (4.3)$$

式中 I_{2n} ——变压器计算侧二次额定电流;
 I_{2n_min} ——变压器各侧二次额定电流值中最小值;

I_{2n_max} ——变压器各侧二次额定电流值中最大值。

平衡系数的计算方法即以变压器各侧中二次额定电流为最小的一侧为基准，其它侧依次放大。若最大二次额定电流与最小二次额定电流的比值大于 4，则取放大倍数最大的一侧倍数为 4，其它侧依次减小；若最大二次额定电流与最小二次额定电流的比值小于 4，则取放大倍数最小的一侧倍数为 1，其它侧依次放大。装置为了保证精度，所能接受的最小系数 K_{ph} 为 0.25，因此差动保护各侧电流平衡系数调整范围最大可达 16 倍。

表 4.3 1#主变互感器参数、额定电流、平衡系数的计算结果

计算项目	220kV	110 kV	10.5 kV
额定电流 I_{1n} (A)	315	630	6598
TA 接线	Y 接线	Y 接线	Y 接线
计算 TA 变比	315/5	630/5	6598/5
选用 TA 变比	600/5	1000/5	3000/5
二次电流 I_{2n}	2.63	3.15	11.00
平衡系数	4	3.34	0.96

(2) 差动各侧电流相位差的补偿

变压器各侧电流互感器采用星形接线，二次电流直接接入本装置。电流互感器各侧的极性参见前图，都以母线侧为极性端。

变压器各侧 TA 二次电流相位由软件调整，装置采用 $\Delta \rightarrow Y$ 变化调整差流平衡，这样可明确区分涌流和故障的特征，大大加快保护的動作速度。对于 $Y_0/\Delta-11$ 的接线，其校正方法如下：

Y_0 侧：

$$\begin{cases} \dot{I}'_A = (\dot{I}_A - \dot{I}_0) \\ \dot{I}'_B = (\dot{I}_B - \dot{I}_0) \\ \dot{I}'_C = (\dot{I}_C - \dot{I}_0) \end{cases} \quad (4.4)$$

式中 $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ ——Y₀ 侧 TA 二次电流;

$\dot{I}'_A, \dot{I}'_B, \dot{I}'_C$ ——Y₀ 侧校正后的各相电流。

Δ 侧:

$$\begin{cases} \dot{I}'_a = (\dot{I}_a - \dot{I}_c) / \sqrt{3} \\ \dot{I}'_b = (\dot{I}_b - \dot{I}_a) / \sqrt{3} \\ \dot{I}'_c = (\dot{I}_c - \dot{I}_b) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (4.5)$$

式中 $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ ——Δ侧TA 二次电流;

$\dot{I}'_a, \dot{I}'_b, \dot{I}'_c$ ——Δ侧校正后的各相电流。

其它接线方式可以类推。装置中可通过变压器接线方式整定控制字) 选择接线方式。

(3) 差动电流起动定值

I_{cdq} 为差动保护最小动作电流值, 应按躲过正常变压器额定负载时的最大不平衡电流整定, 即:

$$I_{cdq} = K_{rel}(K_{er} + \Delta U + \Delta m)I_e \quad (4.6)$$

式中 I_e ——变压器二次额定电流;

K_{rel} ——可靠系数 (一般取1.3~1.5);

K_{er} ——电流互感器的比误差 (10P 型取 0.03×2 , 5P 型和TP 型取 0.01×2);

ΔU ——变压器调压引起的误差, 取调压范围中偏离额定值的最大值 (百分值);

Δm ——由于电流互感器变比未完全匹配产生的误差, 可取为0.05。

计算得： $I_{cdqd}=1.5(0.06+0.1+0.05)2.63=0.83(A)$

在工程实用整定计算中可选取 $I_{cdqd} = (0.2 \sim 0.5) I_e$ ，并应实测最大负载时差回路中的不平衡电流。

注意装置的差动电流起动值的整定计算是以变压器的二次额定电流为基准。若在实际的整定计算中差动起动电流整定值是归算到变压器某一侧的电流有名值，则将这一有名值除以变压器这一侧的变压器二次额定电流，即为保护装置的整定值（标么值）。

(4) 拐点电流的选取

对于稳态比率差动的两个拐点电流，装置分别取为 $0.5I_e(1.32A)$ 和 $0.6I_e(1.58A)$ 。

(5) 比率差动保护灵敏度的校核

灵敏系数应按最小运行方式下差动保护区内变压器引出线上两相金属性短路计算。根据计算最小短路电流 $I_{k.min}$ 和相应的制动电流 I_{res} ，在动作特性曲线上查得对应的动作电流 I_{op} ，则灵敏系数为： $K_{sen}=I_{k.min}/I_{op}$ ；要求 $K_{sen} > 2$ 。

(6) 差动速断保护

差动速断保护可以快速切除内部严重故障，防止由于电流互感器饱和引起的纵差保护延时动作。其整定值应按躲过变压器励磁涌流整定，一般可取：

$$I_{cdsd}=K \cdot I_e \quad (4.7)$$

式中 K ——倍数，视变压器容量和系统阻抗的大小。40~120MVA 的变压器 K 值可取 3.0~6.0；120MVA 及以上的变压器 K 值可取 2.0~5.0。即变压器容量越大，或系统电抗越大， K 的取值越小。

计算得： $I_{cdsd}=3 \times 2.63=7.89(A)$

差动速断保护灵敏系数应按正常运行方式下保护安装处两相金属性短路计算，要求 $K_{sen} \geq 1.2$ 。

$$K_{sen} = \frac{I_{k.min}}{I_{cdsd}} \quad (4.8)$$

式中 $I_{k.min}$ ——正常运行方式下保护安装处两相金属性短路电流。

计算得： $K_{sen} = \frac{2717}{7.89 \times 120} = 2.87 \geq 1.2$

注意装置的差动速断电流值的整定计算是以变压器的二次额定电流为基准。若在实际的整定计算中差动速断电流整定值是归算到变压器某一侧的电流有名值，则将这一有名值除以变压器这一侧的变压器二次额定电流，即为保护装置的整定值（标么值）。

(7) 谐波制动比的整定

在利用二次谐波和三次谐波制动来防止励磁涌流误动的差动保护中，二次谐波制动比和三次谐波制动比分别表示差电流中的二次谐波分量，三次谐波分量与基波分量的比值。一般二次谐波制动比可整定为 10% ~ 20%，三次谐波制动比可整定为 10% ~ 20%。

4.4.1.2 零序比率差动

零差保护的整定计算方法参见稳态比率差动保护，取 $\Delta U=0$ 。零序差动所用电流互感器各侧的极性参见前图，即高、中压侧都以母线侧为极性端，公共绕组侧以中性点为极性端。

(1) 零差电流起动定值的计算

零差电流起动定值应按躲过正常变压器额定负载时的最大不平衡电流整定，即：

$$I_{0cdqd}=K_{rel}(K_{er}+\Delta m)I_e \quad (4.9)$$

式中： I_e ——为变压器二次额定电流；

K_{rel} ——可靠系数（一般取 1.3~1.5）；

K_{er} ——电流互感器的比误差（10P 型取 0.03×2 ，5P 型和 TP 型取 0.01×2 ）；

Δm ——由于电流互感器变比未完全匹配产生的误差，可取为 0.05。

计算得 $I_{0cdqd}=0.5 \times 2.63=1.32(A)$

在工程实用整定计算中可选取起动值为 $(0.2 \sim 0.5) I_e$ ，并应实测最大负载时零差回路中的不平衡电流。

注意装置的零差电流起动值是以 TA 的二次额定电流 I_n (1A 或 5A) 为单位，其整定计算以零差各侧中平衡系数最小的一侧为基准。若在实际的整定计算中是归算到上述的基准侧后的电流有名值，则将这一有名值除以 TA 的二次额定电流 (1A 或 5A)，即为保护装置的整定值。

(2) 零序比率差动保护灵敏度的校核

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{k.min}}^{(1)}}{I_{0\text{cdsd}}} \quad (4.10)$$

式中： $I_{\text{k.min}}^{(1)}$ ——正常小方式下保护安装处单相金属性短路电流。

$$\text{计算得： } K_{\text{sen}} = \frac{3407}{1.32 \times 120} = 21 \geq 2$$

按零序差动保护区内发生金属性接地短路校验灵敏系数；要求 $K_{\text{sen}} \geq 2$ 。大电流接地系统的单相接地短路电流中的零序电流分配完全取决于系统零序网的分布，而单相故障电流的大小，不但与系统零序阻抗有关，而且与系统的正、负序阻抗有关，也就是说与系统运行方式有关。在系统检修等方式时为了保持系统零序网基本不变，提高接地保护灵敏度，220kV 系统通常运用适当调整变压器中性点接地来弥补。因此，在 220kV 系统校验零序差动保护灵敏度时应选用正常小方式。

4.4.2 后备保护整定计算

4.4.2.1 复合电压闭锁方向过流

(1) 复合电压起动过电流保护

1). 电流继电器的整定计算

电流继电器的动作电流应躲过变压器的额定电流，计算公式如下：

$$I_{\text{op}} = \frac{K_{\text{rel}}}{K_{\text{r}}} I_{\text{n}} \quad (4.11)$$

式中 K_{rel} ——可靠系数，可取 1.2；

K_{r} ——返回系数，可取 0.95；

I_{n} ——变压器的额定电流（二次值）。

$$\text{计算得： } I_{\text{op}} = \frac{1.2}{0.95} \times 2.63 = 3.32(\text{A})$$

2). 低电压继电器的整定计算

低电压继电器应躲过电动机起动，计算公式如下：

a). 当低电压继电器由变压器低压侧电压互感器供电时

$$U_{op} = \frac{U_{min}}{K_{rel} \cdot K_r} \quad (4.12)$$

式中 K_{rel} ——可靠系数，可取 1.1~1.2；

K_r ——返回系数，可取 1.05；

U_{min} ——变压器正常运行可能出现的最低电压，一般可取 $0.9U_n$ （额定线电压二次值）。

计算得： $U_{op} = \frac{0.9 \times 100}{1.2 \times 1.05} = 71(V)$ ； 取 71V。

b). 当低电压继电器由变压器高压侧电压互感器供电时

$$U_{op} = 0.7U_n \quad (4.13)$$

式中 U_n ——额定线电压二次值。

计算得： $U_{op} = 0.7U_n = 70V$

3). 负序电压继电器的整定计算

负序电压继电器应躲过正常运行时出现的不平衡电压，不平衡电压值可实测确定。一般可取：

$$U_{op,2} = (0.06-0.08)U_{\Phi n} \quad (4.14)$$

式中 $U_{\Phi n}$ ——额定相电压二次值。

计算得： $U_{op,2} = 0.06 \times 57.7 = 3.5 (V)$

4). 灵敏度校验

a). 电流继电器的灵敏度校验：

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{k.min}}^{(2)}}{I_{\text{op}}} \quad (4.15)$$

式中 $I_{\text{k.min}}^{(2)}$ ——后备保护区末端两相金属性短路时流过保护的最小短路电流（二次值）。

计算得：110kV 侧母线最小短路电流： $I_{\text{k.min}}^{(2)}=2553\text{A}$ ；归算到 220kV： $I_{\text{k.min}}^{(2)}=1277\text{A}$

$$K_{\text{sen}} = \frac{1277}{3.32 \times 120} = 3.2 \geq 1.3$$

要求 $K_{\text{sen}} \geq 1.3$ （近后备）或 1.2（远后备）。

(2) 相间故障后备保护方向元件的整定

三侧有电源的三绕组升压变压器，相间故障后备保护为了满足选择性的要求，在高压侧或中压侧要加功率方向元件，其方向一般指向该侧母线。

高压及中压侧有电源或三侧均有电源的三绕组降压变压器和联络变压器，相间故障后备保护为了满足选择性的要求，在高压侧或中压侧要加功率方向元件，其方向一般指向变压器，也可指向本侧母线。

4.4.2.2 零序过流

(1) 零序电流继电器的整定

对于高压及中压侧均直接接地的三绕组普通变压器，高中压侧均应装设零序方向过电流保护，方向指向本侧母线。

I 段零序过电流继电器的动作电流应与相邻线路零序过电流保护第 I 段或 II 段或快速主保护相配合：

$$I_{\text{op.o.I}} = K_{\text{rel}} K_{\text{brl}} I_{\text{op.o.II}} \quad (4.16)$$

式中 $I_{\text{op.o.I}}$ ——I 段零序过电流保护动作电流（二次值）；

K_{brl} ——零序电流分支系数，其值等于线路零序过电流保护 I 段保护区末端发生接地短路时，流过本保护的零序电流与流过该线路的零序电流之比，取各种运行方式的最大值；

K_{rel} ——可靠系数，取 1.1；

$I_{\text{op.o.II}}$ ——与之相配合的线路保护相关段动作电流（二次值）。

计算得：220kV 侧： $I_{op.o.I}=K_{rel}K_{bri}I_{op.o.II}=1.1\times 0.49\times (2016/120)=9.1$

110kV 侧： $I_{op.o.I}=K_{rel}K_{bri}I_{op.o.II}=1.1\times 1\times (1420/200)=7.81$

(2) 零序电流继电器的灵敏度的校验

灵敏度应按下式校验：

$$K_{sen} = \frac{3I_{k.o.min}}{I_{op.o}} \quad (4.1)$$

式中 $3I_{k.o.min}$ ——I 段（或 II 段）保护区末端接地短路时流过保护安装处的最小零序电流（二次值）；

$I_{op.o}$ ——I 段（或 II 段）零序过电流保护的动作电流。

220kV 侧： $3I_{k.o.min}$ =分支系数×最小单相接地电流= $0.41\times 3507=1438(A)$

$$\therefore K_{sen} = \frac{3I_{k.o.min}}{I_{op.o}} = \frac{1438/120}{9.1} = 1.32 > 1.3$$

110kV 侧： $3I_{k.o.min}$ =分支系数×最小单相接地电流= $1\times 3803=3803(A)$

$$\therefore K_{sen} = \frac{3I_{k.o.min}}{I_{op.o}} = \frac{3803/200}{7.81} = 2.43 > 1.3$$

要求 $K_{sen} \geq 1.3$ 。

4.4.2.3 变压器不接地运行时的后备保护

对于中性点经放电间隙接地的变压器，应增设反应零序电压和间隙放电电流的零序电压电流保护。

(1) 零序过电压继电器的整定

过电压保护动作值按下式整定：

$$U_{0.max} < U_{op.0} \leq U_{sat} \quad (4.18)$$

式中 $U_{op.0}$ ——零序过电压保护动作值（二次值）；

$U_{0.max}$ ——在部分中性点接地的电网中发生单相接地时或中性点不接地变压器两相运行时，保护安装处可能出现的最大零序电压（二次值）；

U_{sat} ——用于中性点直接接地系统的电压互感器，在失去接地中性点时发生单相接地，开口三角绕组可能出现的最低电压。

考虑到中性点直接接地系统 $\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} \leq 3$ ，一般取：

$U_{op,0}=180V$ （注：高压系统电压互感器开口绕组每相额定电压为 100V）

(2) 间隙零序过电流继电器的整定

装在放电间隙回路的零序过电流保护的動作电流与变压器的零序阻抗、间隙放电的电弧电阻等因素有关，一般保护的一次動作电流可取为 100A。

4.4.3 保护的整定计算结果

表 4.4 主保护、后备保护整定计算结果

计算项目	计算原则	计算结果 (二次值)
差动电流起动定值	按躲过正常变压器额定负载时的最大不平衡电流整定	0.83A
拐点电流	稳态比率差动的两个拐点电流，装置分别取为 $0.5I_e$ 和 $0.6I_e$	1.32A 1.58A
差动速断保护定值	按躲过变压器励磁涌流整定，120MVA 及以上的变压器 K 值可取 2.0~5.0	7.89A
零差电流起动定值	按躲过正常变压器额定负载时的最大不平衡电流整定	1.32A
复合电压起动过电流保护电流定值	电流继电器的動作电流应躲过变压器的额定电流	3.32(A)
复合电压起动过电流保护电压定值	当低电压继电器由变压器低压侧电压互感器供电时； 或当由变压器高压侧电压互感器供电时	71V； 70V
复合电压起动过电流保护负序电压定值	负序电压继电器应躲过正常运行时出现的不平衡电压	3.5V
零序过流电流定值	I 段零序过电流继电器的動作电流应与相邻线路零序过电流保护第 I 段或 II 段或快速主保护配合	12A(220kV) 19A(110kV)
零序过电压继电器的整定	过电压保护動作值按下式整定： $U_{0,max} < U_{op,0} \leq U_{sat}$	180V
间隙零序过电流继电器的整定	装在放电间隙回路的零序过电流保护的動作电流与变压器的零序阻抗、间隙放电的电弧电阻等因素有关	100A

5 低频减载的 matlab 软件仿真

5.1 matlab 软件的基本认识

MATLAB 语言是由美国的 Cleve Moler 博士首创的。1980 年前后，他开发了 MATLAB (MATrix LABoratory, 即矩阵实验室), 这便是萌芽状态的 MATLAB。在 MATLAB 下, 矩阵的运算变得异常容易, 所以它一出现就广受欢迎, 这一系统逐渐发展、完善、逐步走向成熟, 形成了今天的模样。

MATLAB 是以复数矩阵作为基本编程单元的一种高级程序设计语言, 是一个高度集成的软件系统, 它集科学与工程计算、图形可视化、图像处理、多媒体处理于一身, 并提供了实用的 Windows 图形界面设计方法, 使用户能设计出友好的图形界面。MATLAB 语言在自动控制、航天工业、汽车工业、生物医学工程、语音处理、图像信号处理、雷达工程、信号分析、电力系统分析、计算机技术等各行各业中都有极为广泛的应用。

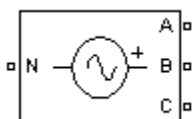
SIMULINK 是以工具箱的形式挂接在 MATLAB 上的, 不能独立运行, 只能在 MATLAB 环境中运行。SIMULINK 是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包, 它支持连续、离散或两者混合的线性 and 非线性系统, 也支持具有多种采样速率的多速率系统。

SIMULINK 是由模块库、模型构造及指令分析、演示程序等几部分组成。SIMULINK 提供了用方框图进行建模的图形接口。模块框图是动态系统的图形显示, 由一组称为模块的图标组成, 模块之间采用连线联接。每个模块代表了动态系统的某个单元, 并且产生一定的输出。模块之间的连线表明模块的输入端口与输出端口之间的信号连结。模块的类型决定了模块输出与输入、状态和时间之间的关系。一个模块框图可以根据需要包含任何类型的模块。模块代表了动态系统的某个功能单元, 每个模块一般包括一组输入、状态和一组输出等几个部分^{[14][15]}。

SIMULINK 模块的基本特点是参数化的, 许多模块都具有独立的属性对话框, 在对话框中用户可以定义模块的各种参数。SIMULINK 包含 Sinks (输出方式)、Source (输入源)、Continuous (连续环节)、Nonlinear (非线性)、Discrete (离散环节)、Signals & System (信号与系统)、Math (数学模块) 和 Functions & Tables (函数和查询表) 等子模型库。SIMULINK 在诸如 Communication Toolbox, Nonlinear Control Design Blockset, Power System Blockset 等工具箱的配合下, 还可以完成对诸如通行系统、非线性控制系统、电力系统的建模、分析和仿真。

5.2 设计中使用的模块

本次仿真主要使用的模块位于 Simpowersystems 模块库，介绍如下：



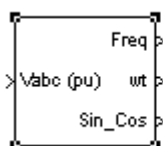
a)三相可编程电压源



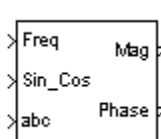
b)三相 RLC 串联支路



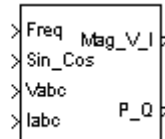
c)三相电压电流测量元件



d)离散三相
相同步回路系统



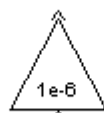
e)离散三相相同步回路
驱动的正序基频测量元件



g)离散三相相同步回路
驱动的正序有功与无功
功率测量元件



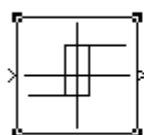
h)信号分离器



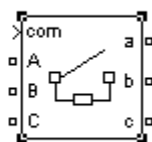
i)增益模块



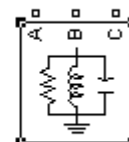
j)终结器



k)继电器模块



l)三相断路器



m)三相 RLC 并联负载

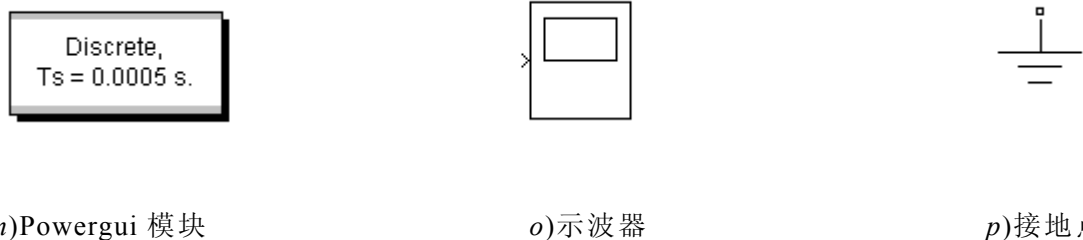


图 5.1 建模所用模块图

5.3 低频减载仿真模型概述

电力系统数字仿真已成为电力系统规划设计、调度运行和分析研究的主要工具，电力系统各元件的数学模型以及由其构成的全系统数学模型是电力系统数字仿真的基础，模型的准确与否直接影响仿真结果和以此为基础的决策方案，目前微机型低频减载装置已被广泛使用，使准确地测量负荷及负荷的频率响应特性成为现实，因此能实现上述的实时测量方案，增强了低频减载装置适应系统变化的能力，并实现对减载量的准确控制^[8~10]。现代电力系统以高电压、大容量为其主要特征，这在某方面也削弱了在大扰动下维持频率稳定性的能力，如果发生恶性频率事故，则波及面广，影响很大，低频减载作为电力系统的第三道防线，将是一种抑制频率下降的有效方法^[11~12]。

参照上述原则设计一电力系统模型与装置，实现频率降低到某一定值时自动切除相应负荷^[7]。该模型如下图所示，在图中用三相可编程电压源(3-Phase Programmable Voltage Source)模拟电力系统的频率变化；使用三相RLC 串联支路模块(3-Phase series RLC Branch)模拟系统阻抗及确定短路功率水平；使用离散三相相同步回路系统模块(Discrete 3-phase PLL)测量瞬时频率及二维信号 $[\sin(\omega t) \cos(\omega t)]$ ，为后面的测量提供参考；使用离散三相相同步回路驱动的基频正序测量元件(Discrete 3-phase PLL-Driven Positive-Sequence Fundamental Value)观察切除负荷对正序电压及相位的影响；使用离散三相相同步回路驱动的正序有功与无功功率测量元件(Discrete 3-phase PLL-Driven Positive-Sequence Active & Reactive Power)观察功率的变化情况，使用继电器模块(Relay)对断路器的控制以根据频率降低切除负荷。

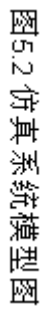


图5.2 仿真系统模型图

5.4 仿真模块参数设置及其作用

5.4.1 三相可编程电压源(3-Phase Programmable Voltage Source)

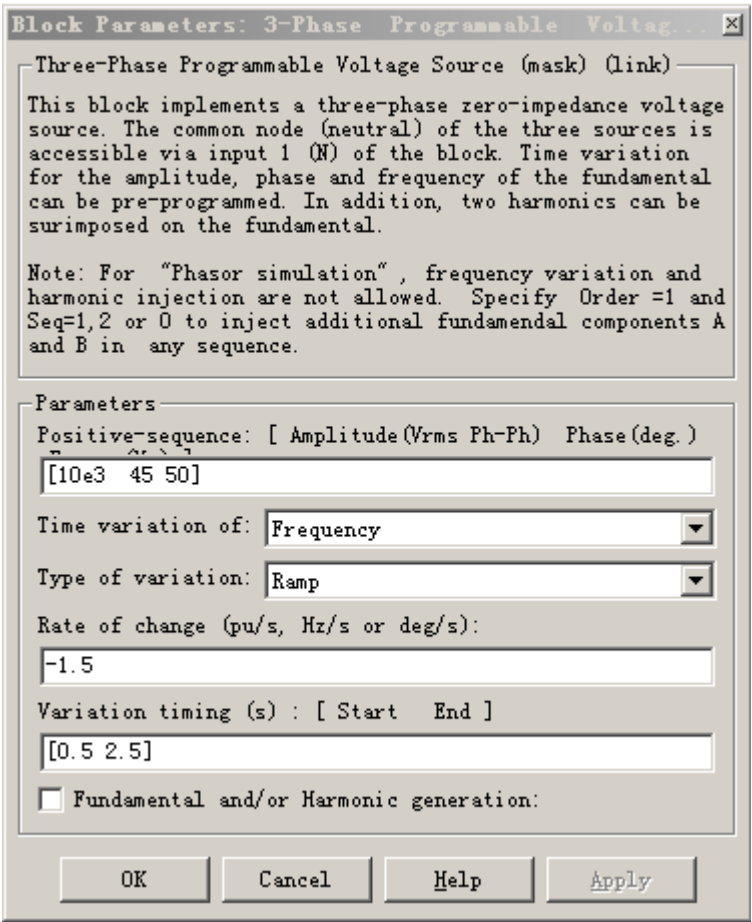


图 5.3 三相可编程电压源参数框

三相可编程电压源模块是一个三相零阻抗电压源。如图所示，第一条空白行依次填上线电压有效值、相角、额定频率；第二空白行选择随时间变化的量，应选择频率 Frequency；第三空白行选择变化的模式，选择调制项 Ramp，频率将随斜波变化；第四空白行填写斜波的斜率为-1.5，即频率变化的幅度为每秒-1.5Hz；第五空白行填变化的时间为 0.5、2.5，即开始于 0.5s 终止于 2.5s，即为一个调制周期 2s。

5.4.2 三相 RLC 串联支路(3-Phase series RLC Branch)

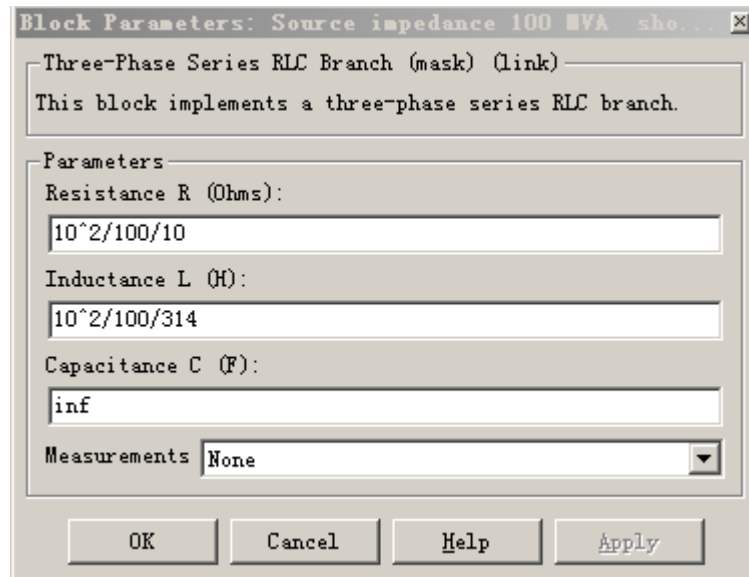


图 5.4 三相 RLC 串联支路参数框

三相 RLC 串联支路模块作为模拟电源阻抗存在，与三相可编程电压源一起组成一个短路容量为 100MVA 的 10kV 系统。参数设置：电阻(Resistance R)、电感(Inductance L)根据短路功率 100MVA、额定电压 10kV，额定频率 50Hz 计算，其中电阻设为阻抗的十分之一；电容(Capacitance C)填为 inf,即无穷大。

5.4.3 三相电压电流测量元件(3-Phase VI Measurement)

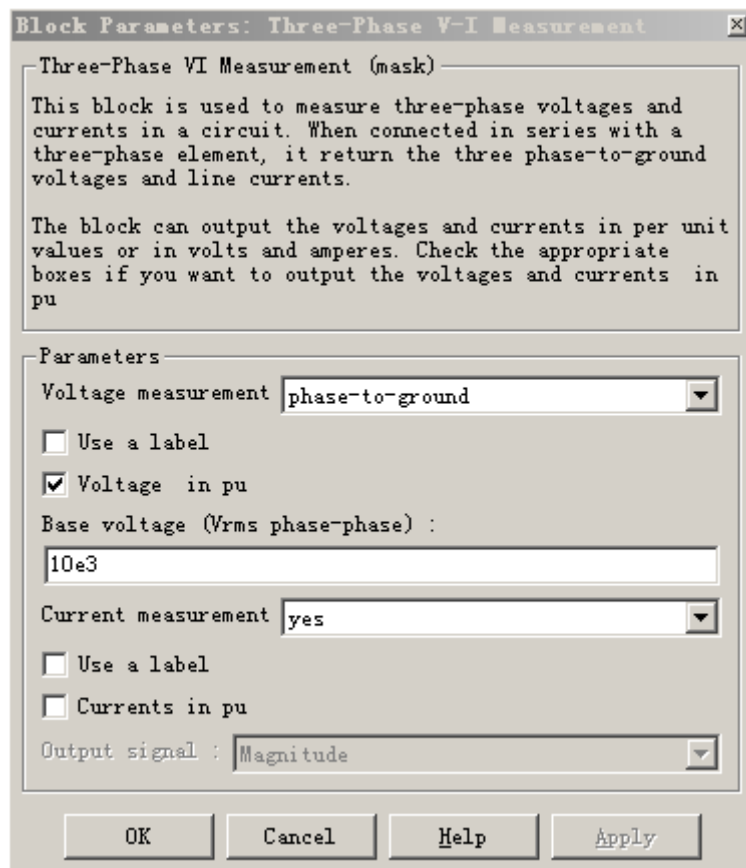


图 5.5 三相电压电流测量元件参数框

三相电压电流测量元件用于测量三相线路的电压与电流。参数设置：在 Voltage measurement 选择框中选 phase-to-ground 以测量相电压；在 Voltage in pu 前打勾以使电压以标么值表示；在 Base voltage 下面的空白框中填 10e3(单位千伏)作为基准电压，与前面的三相可编程电压源设置一致；在 Current measurement 选择框中选 yes,使得电流可被测量。

5.4.4 离散三相相同步回路系统(Discrete 3-phase PLL)

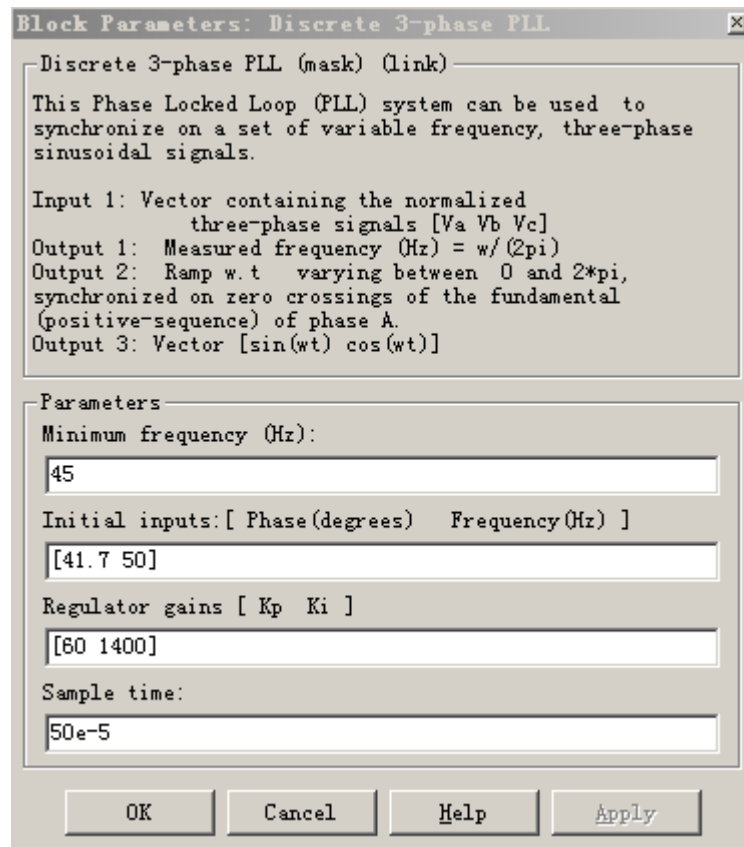


图 5.6 离散三相相同步回路系统参数框

离散三相相同步回路系统可用于同步一组三相正弦频率可变的信号。此模块需输入一组三相电压矢量[Va Vb Vc],输出端口 1 输出测量的频率,输出端口 2 不用,接终结器,输出端口 3 输出矢量[sin(ωt) cos(ωt)],两端口的输出量为后面的测量观察提供原始数据。

参数设置: Minimum frequency 空白框填写最小频率 45 (Hz); Initial inputs 中填写初始相位(单位为度)与初始频率(单位为赫兹),依次填入 41.7 与 50; Regulator gains 项目不需作修改; 采样时间(Sample)项目填 50e.5(单位为秒),即可准确测量。

5.4.5 离散三相相同步回路驱动的基频正序测量元件(Discrete 3-phase PLL-Driven Positive-Sequence Fundamental Value)

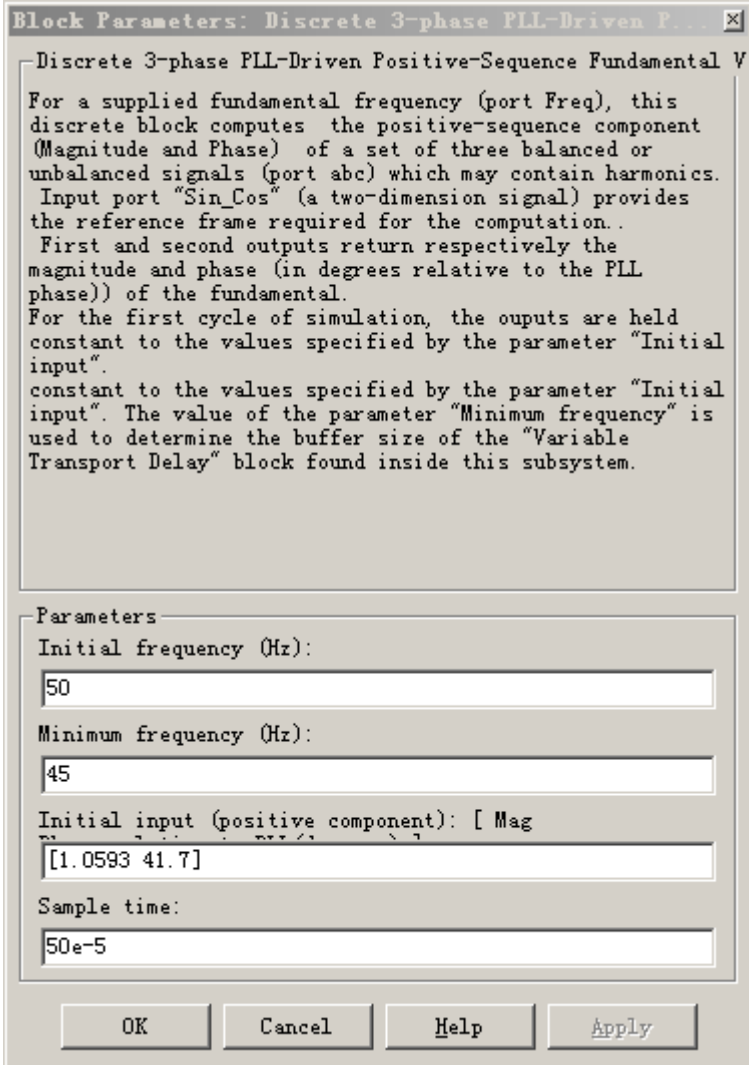


图 5.7 离散三相相同步回路驱动的基频正序测量元件参数框

离散三相相同步回路驱动的基频正序测量元件根据提供的基波频率对一组可能含有谐波的三相平衡或不平衡信号计算它的正序分量的幅值与相位，输入端“Sin_Cos”(输入一个二维信号)为其中的计算提供参考系。在仿真的第一个周期，该元件的输出将保持为常量，与初始设置中数值的一致，如上图所示初始频率 Initial frequency 设为 50Hz，及初始输入 Initial input（正序分量）中幅值、相位依次设为 1.0593（标幺值）、41.7（单位为度）；最小频率 Minimum frequency 的量值用以决定变量传输延时缓冲区的大小，

取样时间与前面保持一致。

5.4.6 离散三相相同步回路驱动的正序有功与无功功率测量元件(Discrete 3-phase PLL-Driven Positive-Sequence Active & Reactive Power)

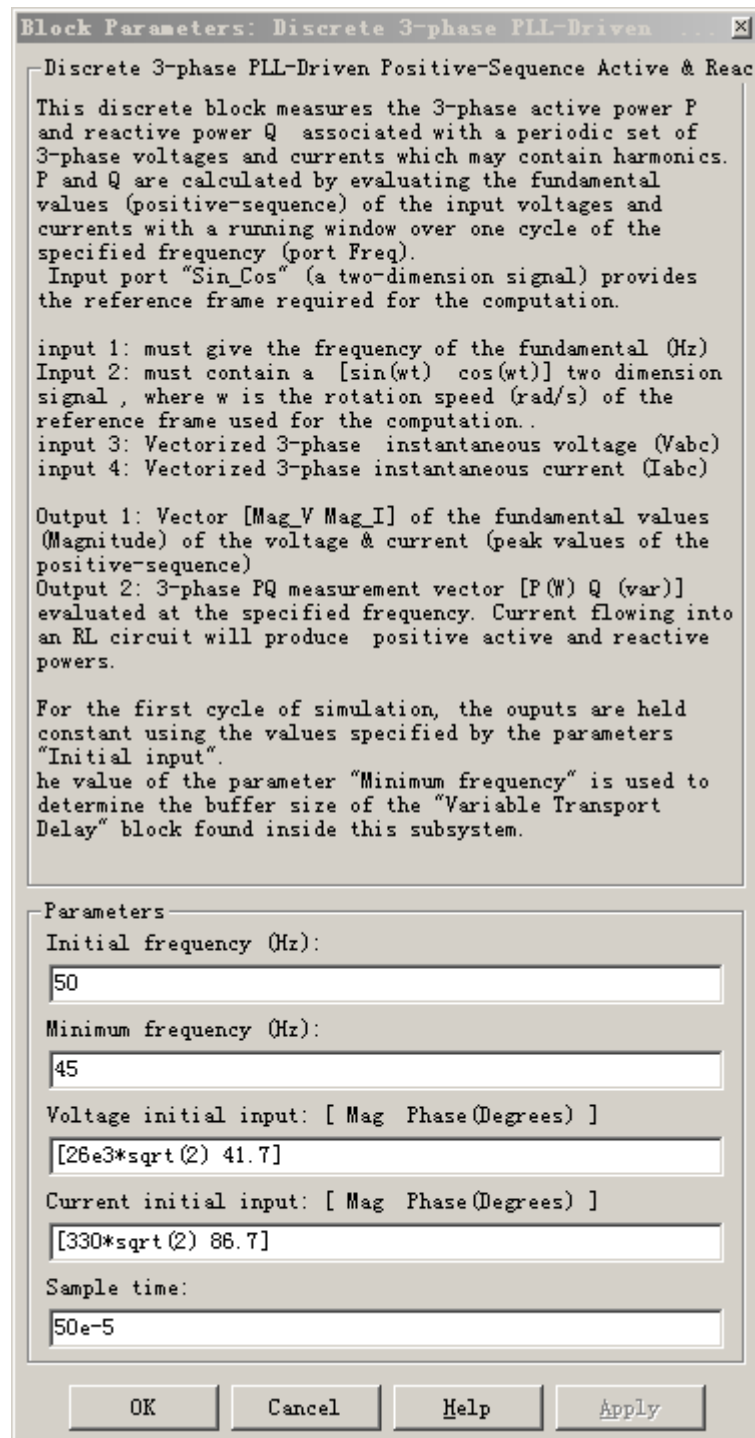


图 5.8 离散三相相同步回路驱动的正序有功与无功功率测量元件参数框

离散三相相同步回路驱动的正序有功与无功功率测量元件可根据可能含有谐波的单位周期内三相电压电流测量出有功功率 P 与无功功率 Q 。 P 与 Q 的计算是以输入的基波电压基波电流及以指定的频率（输入端口 Fre 提供）在多于一周期的时间这些条件为依据的，输入端“Sin_Cos”（输入一个二维信号）为其中的计算提供参考系。Initial frequency, Minimum frequency, Sample time 项目与前述相同。在仿真的第一个周期，该元件的输出将保持为常量，与初始设置（Initial input）中数值的一致，Voltage initial input, Current initial input 项目根据负荷特性及示波器所示作出调整，以使示波器的相应显示从零便进入稳态，所填数值如上图所示。

5.4.7 信号分离器(Demux)

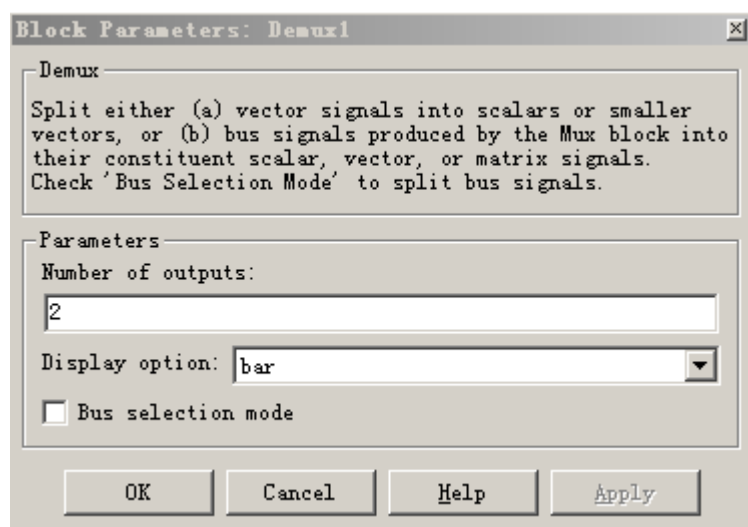


图 5.9 信号分离器参数框

信号分离器可将一个矢量分离成各个标量，或将一个矢量分离成一些更小的矢量。输出端数目 Number of output 填为 2，信号分离器在图中的作用是将离散三相相同步回路驱动的正序有功与无功功率测量元件输出的有功与无功功率组成的二维信号分解成有功功率与无功功率两个标量。

5.4.8 终结器(Terminator)

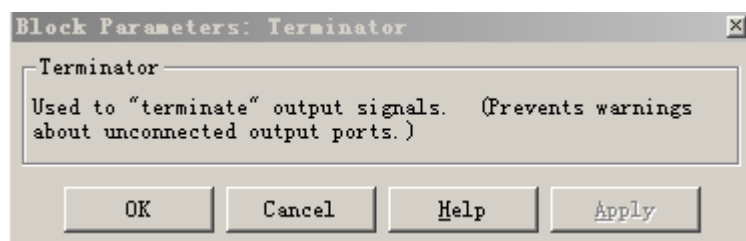


图 5.10 终结器参数框

终结器用以终结输出信号，以防止由于未连接的输出信号而出现的警告提示。

5.4.9 增益模块(Gain)

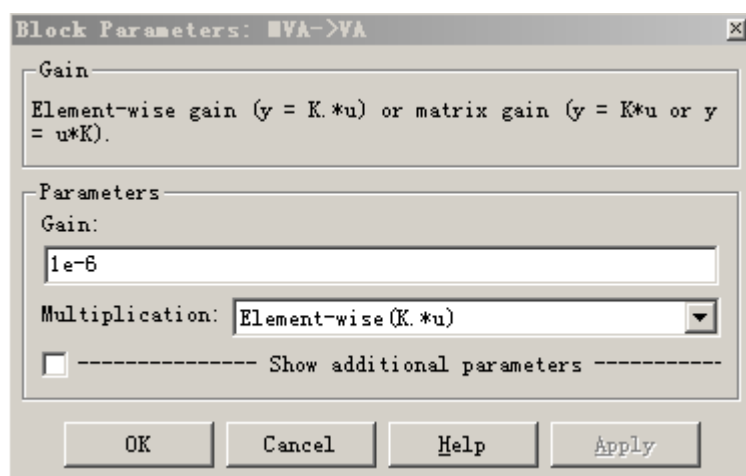


图 5.11 增益模块参数框

增益模块用于将输入信号乘以一个增益系数。在本图中用于将输入信号的单位数量级化为兆，和将标么值化为有名值。

5.4.10 继电器模块(Relay)

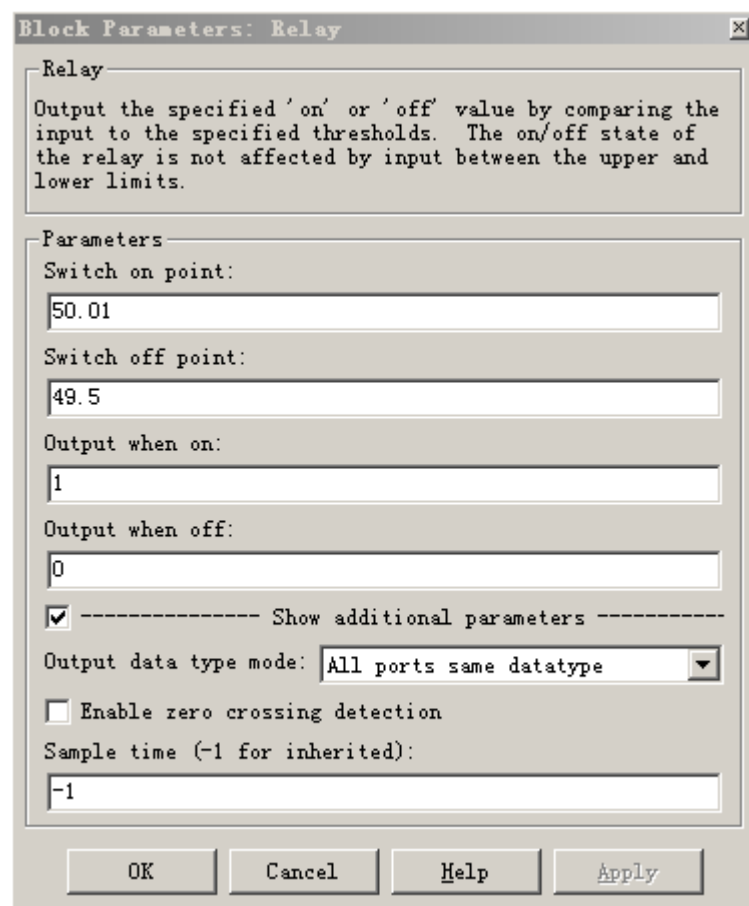


图 5.12 继电器模块参数框

该模块允许输出在两个给定的值（0、1）之间切换。当继电器输出保持为开的状态，输入降得比切断点（Switch off point）的参数值低时，状态变换。当继电器输出保持为关的状态，输入超过接通点（Switch on point）的参数值，状态变换。模块接受一个输入并且产生一个输出。模块接受和输出双精度类型的实数信号。

参数设置如上图所示。采样时间 Sample time 填写.1，即为保持与 Powergui 模块设置的采样时间一致。输入的信号为瞬时频率，当频率数值大于 50.01 时，继电器变为开状态，输出为 1，控制断路器为合状态；当频率数值小于 50.01 时，继电器变为关状态，输出为 0，控制断路器断开，以实现低频减载的功能。

5.4.11 三相断路器(3-phase Breaker)

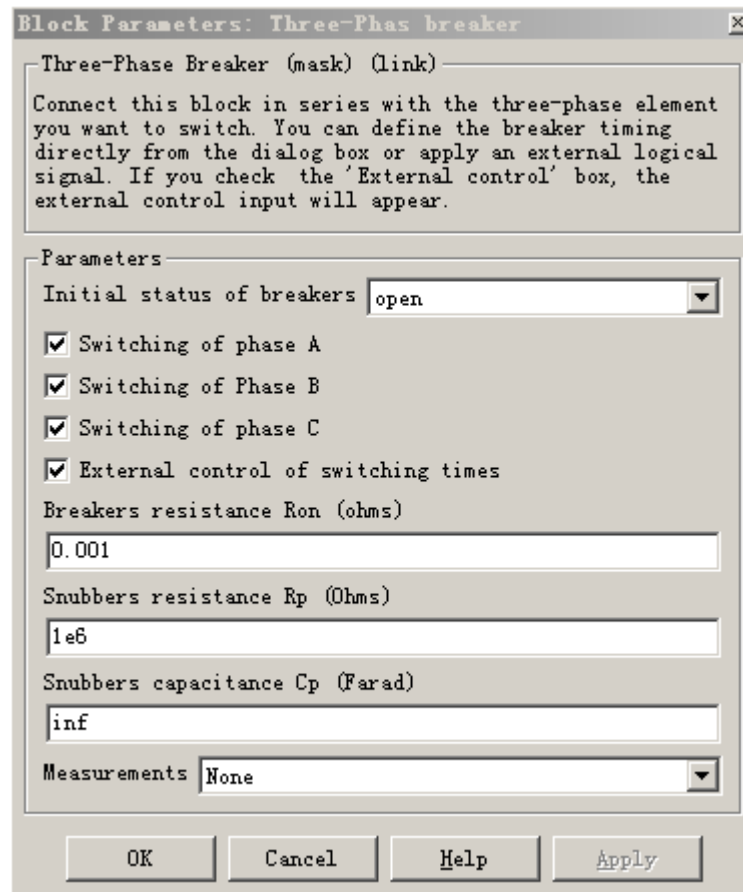


图 5.13 三相断路器参数框

三相断路器模块实现一个三相电路断路器，开关时间可由外部信号控制（外部控制模式），或由一个内部控制定时器控制（内部控制模式）。如果三相断路器模块被设定为外部控制模式，在模块图标上会出现一个控制输入端。连在这个输入上的控制信号必须为 0 或 1，0 使断路器打开，1 使断路器合上。如果三相断路器模块被设为内部控制模式，开关时间可以在模块对话框中设定。

参数设置：断路器初始状态 Initial status of breaks 设为打开 open；开关 A/B/C 相 Switching of phase A/B/C 均设为选中，否则，相应相的断路器就永远停留在初始状态；外部控制开关时间 External control of switching times 设为选中。

5.4.12 三相 RLC 并联负载(3-phase Parallel RLC)

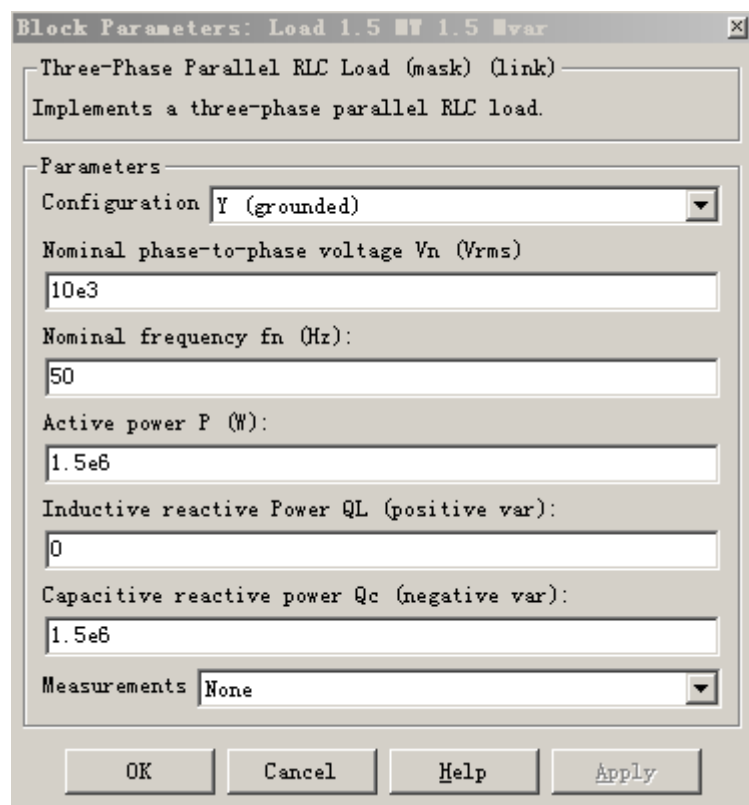


图 5.14 三相 RLC 并联负载参数框

元件结构 Configuration 选项设为 Y(grounded),即为星型接地。其它参数框依次为相间电压有名值(负载相间电压有名值, 用电压有效值表示)、有名值频率(单位为赫兹)、有功功率 P (负载的三相有功功率, 单位为瓦)、感性无功功率 QL (三相的感性无功功率 QL,单位为乏)、容性无功功率 Qc(三相容性无功功率 Qc, 单位为乏)。因为感性无功功率 QL 为零, 故元件模型中无并联的电感符号。此元件用于模拟三相可编程电压源系统所接的理想纯容性负载。

5.4.13 Powergui 模块(Powergui block)

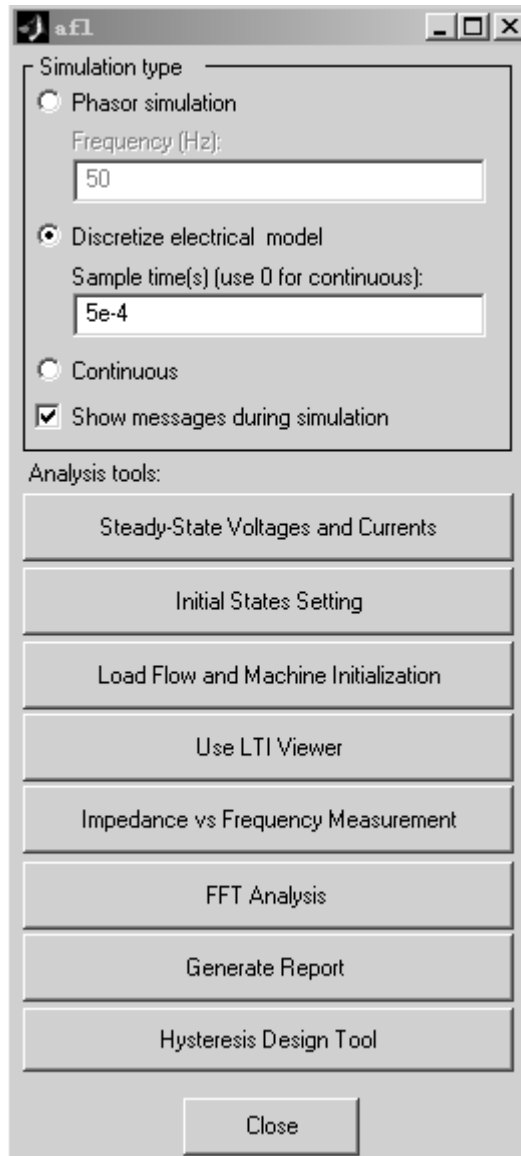


图 5.15 Powergui 模块参数框

选中离散电气模型 Discretize electrical model,设置采样时间为 5e.4s。

5.4.14 示波器

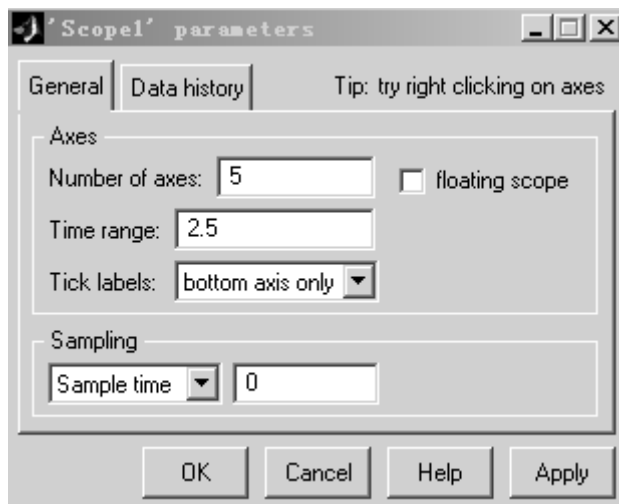


图 5.16 示波器参数框

坐标轴数量填写 5，可同时测量 5 个量；时间范围填写 2.5，即可观察整个频率变化情况。

5.5 仿真结果

5.5.1 继电器输出信号

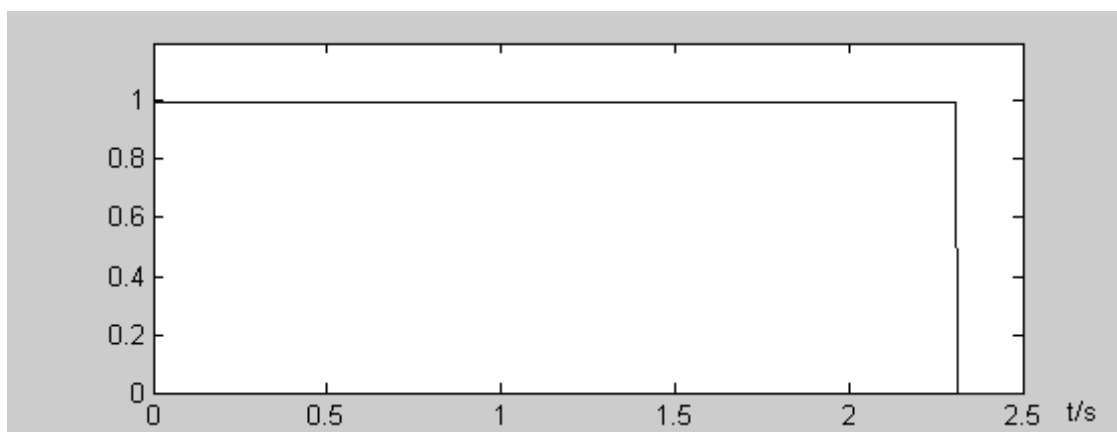


图 5.17 继电器输出信号

根据参数设定，继电器将根据频率的数值而接通和关闭，接通时的频率数值大于关闭时的，继电器接通时输出 1，关闭时输出 0。

5.5.2 频率变化分析

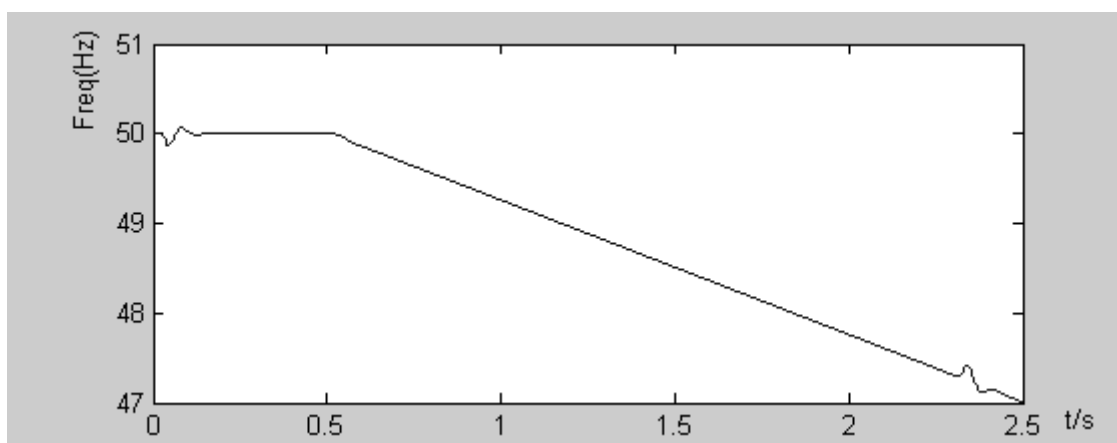


图 5.18 频率

如图所示，所测频率按所选的调制模式以斜波方式变化，变化周期为 2s,变化幅度为 3Hz。在频率数值等于 50 时，继电器模块输出 1 到断路器控

制端 com，断路器合上，接通负荷；在频率数值变化到小于 47.3 时，继电器模块输出 0 到断路器控制端 com，断路器断开，断开负荷。图中在频率数值为 50 与 47.3 时，分别有一向下和向上的抖动，对应于接通与断开负荷，符合分析结果。

5.5.3 基波正序电压分析

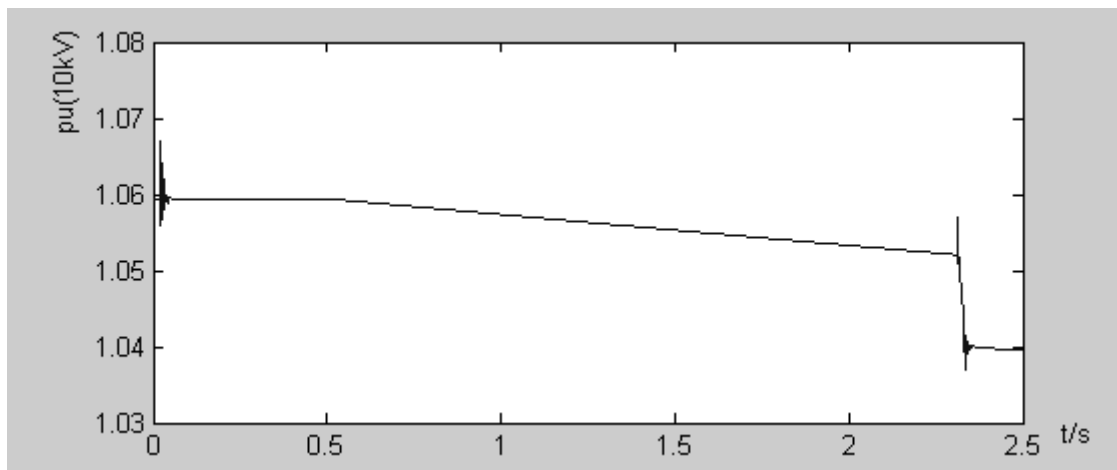


图 5.19 正序电压幅值（标么值）

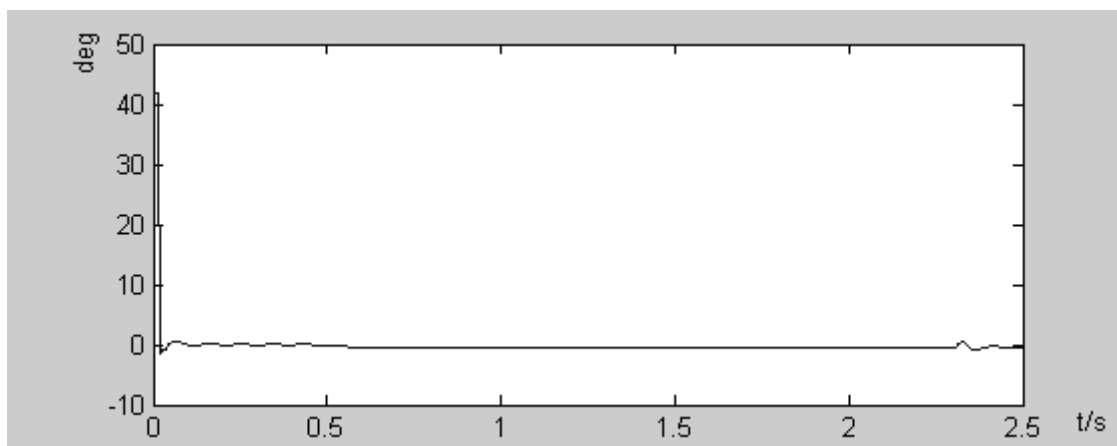


图 5.20 正序电压相位

如图所示，正序电压幅值在负载断开瞬间标么值急剧下降，考虑到所接的负载为纯容性，故系统端的电压降低，符合要求。负载加上期间，系统频率在 0.5 秒后一直在减少，因为功率正比于频率，容性无功功率亦一直在减少，故正序电压幅值呈现轻微下降趋势。正序电压相位在工频一周期后变为零，此后无太大的

变化，说明系统无振荡现象，能快速进入稳态，并作稳态运行。

5.5.4 功率变化分析

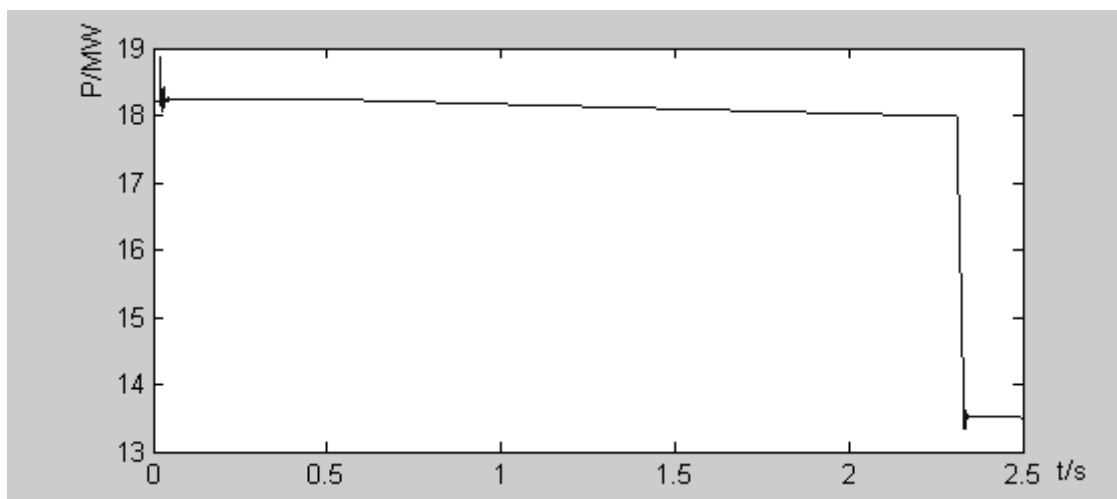


图 5.21 有功功率

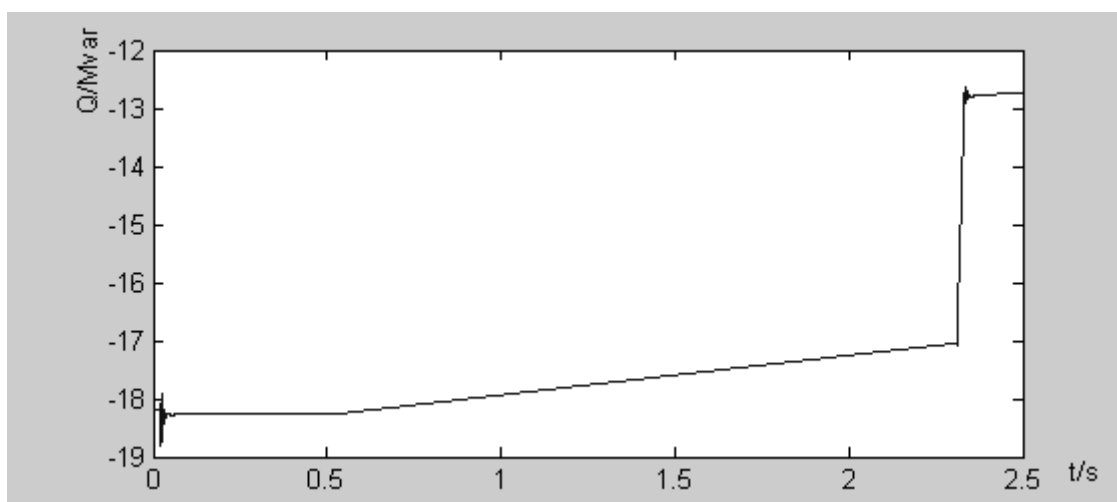


图 5.22 无功功率

负载从接上到切除期间，有功功率与容性无功功率均减少，容性无功功率在频率变化期间的波形斜率较大，说明它受频率变化的影响较大。

6 结论

本次毕业设计工作完成了对一个地区降压变电所主变压器的继电保护具体设计及利用 matlab 软件对电力系统低频减载这一动作过程的仿真设计。

在毕业设计工作期间本人阅读了大量相关的资料且温习了继电保护专业知识和 matlab 软件应用的基本知识, 学习了解 220kV 降压变电所在电力系统中的作用与地位及变电所二次部分的技术发展情况与二次设计的基本原理, 系统地对继电保护的理论知识进行实践性的认识, 并结合实际的保护装置产品进行保护配置。研究了按频率降低自动减负荷理论的基本原理, 了解现代高电压、大电网、大容量电力系统频率事故的特点与危害及各种低频减载方法的内容与优缺点, 认识到按频率降低自动减负荷是保证电力系统频率稳定性的重要措施。

具体的工作总结如下:

(1) 根据所收集的变电所资料与有关的变电所专业书籍, 初步确定设计一个 220kV 降压变电所。根据变电所所在电力系统的特点, 确定其主接线方式, 绘制其一次主接线图, 确定每条进线所接系统的参数。在一次主接线图上确定应进行短路电流计算的短路点, 为将要进行的继电保护设计作准备。绘制各短路点的各序网图, 计算各短路点的各序等效阻抗, 并对某些有特殊要求的短路点计算母线处的分流系数。计算各种状态下的各类短路电流数值, 最后根据所得的短路电流数值结合实际的保护装置对变电所的主变压器二次部分设计。

(2) 学习 Matlab 软件的基本功能, 熟悉 Simulink 及其中 SimPowerSystems 工具箱, 对工具箱中的大部分模块有了较详细的了解。利用 Simulink 中的 SimPowerSystem 工具箱与 matlab 的辅助建模设计功能, 构建了一个由三相可编程电压源组成的 10kV 供电系统的低频减载的仿真模块。通过对仿真结果中各种波形的观察分析, Simulink 和 SimPowerSystem 工具箱确实能模拟电力系统故障和对低频减载过程仿真, 并且所设计的模型分析结果与实际设备动作时系统各电气量的变化结果较为接近, 确实起到了低频减载作用。通过学习 Matlab 软件参阅一些参考书和文献

本课题研究尚有不足之处, 虽然对变电所的最重要部分主变压器进行了二次设计, 但本次变电所二次设计并不是很全面, 还有很多方面和细节问题值得研究, 如在二次回路、厂用电等方面。在继电保护仿真软件中, 并未能在一个非线性的动态负荷扰动的情况下仿真, 尚缺少很大的实践性。在教学与科研过程中发挥更大的作用, 还需进一步作出研究, 使仿真更具针对性。

致谢

本文是在韩笑老师的悉心指导和帮助下完成的，韩笑老师作风严谨踏实对设计要求严格使我能把自己的学习能力得到极大的锻炼与充分的发挥；也非常感谢各位设计组员给予我精神上的鼓励与工作上的无私帮助。作为本科生，在知识的掌握及分析问题、处理问题的能力等方面尚有许多欠缺之处，韩笑老师在许多方面给予我大量的指导。在此，谨表示衷心的感谢。

感谢南京工程学院电力工程系的各位老师们的培养、关心和支持。
最后，感谢我的同学们给予我多方面的帮助和支持。

二〇〇七年六月于南京工程学院

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护(第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994
- [2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 熊炳耀. 电力系统继电保护与安全自动化装置整定计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993
- [3] 韩笑. 电气工程专业毕业设计指南(继电保护分册) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003
- [4] 唐宜芬. 220kV 变压器保护的配置、接线和整定原则(Collocation, Wiring and Setting Calculation Principle of 220kV Power Transformer Protection)[J]. 广东电网公司广州供电分公司(Guangdong Power Grid Corporation Guangzhou Power Supply Branch), 2005
- [5] 宋继成. 220~500kV 变电所电气接线设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [6] 许正亚. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993
- [7] 许正亚. 电力系统安全自动装置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- [8] Delfino B, Massucco S, Morini A et al. Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes[C]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2001, 1: 307-312.
- [9] Terzija V V, Koglin H J. Adaptive under-frequency load shedding integrated with a frequency estimation numerical algorithm[J]. IEEE Proc-Gener. Trans. Distrib, 2002, 149(6): 713-718.
- [10] 孟昭敦, 杜宁宁, 王国柱. 电力系统低频减负荷方案 (On Designing Under-frequency Load Shedding Scheme In Power Systems [J]. 山东工业大学学报 (Journal Of Shandong University Of Technology), 1998, 6(2): 169-173
- [11] Chia-Jen, Yuan-Tien Chen, Hsiao-Dong Chiang, et al. Dynamics Load Models in

-
- Power System Using The Measurement Approach[J]. IEEE Transactions on Power System, 1993, 8(1) : 309-315
- [12] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 张东霞. 负荷建模的基本原则和方法 (Study on Essential Principle and Methods for Load Modeling) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2007, 31 (4): (1-3)
- [13] General Electric Company. Load modeling for power flow and transient stability computer studies[R]. EPRI, 1987.
- [14] 吴天明, 谢小竹, 彭彬. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [15] 王忠礼, 段慧达, 高玉峰. MATLAB 应用技术—在电气工程与自动化专业中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社

附录 1：外文资料翻译

A1.1 负荷潮流分析

PowerStation® 潮流分析程序计算母线电压，支路功率因数，电流，和整个电力系统的潮流。该程序中允许进行调节平衡节点电压，不调节多个电源与等效电网和发电机的连接。它适用于辐射型系统和环形系统。为获得较好的精确度有不同的方法可供选择。

本章为有些名词作了定义并解释了运行潮流分析时可能用到的工具。并说明了不同潮流计算方法的理论背景。

潮流工具条部分解释了如何启动一个潮流计算，如何打开并查看输出报告，如何选择显示选项。潮流分析案例编辑器部分解释了如何创建一个新的分析案例，设定分析案例时需要哪些数据，如何设定它们。显示选项部分解释了显示一些主要系统参数和在单线图中输出报告时的选项，以及如何设定这些参数。潮流计算方法部分列出了不同潮流计算方法的公式。这部分还将进行比较收敛率，在不同系统参数和配置的情况下提高收敛率，还提供了一些选择相应计算方法的技巧。计算需求数据部分描述了进行潮流计算所必需的数据以及在什么地方输入这些数据。最后，潮流分析输出报告部分说明并解释了输出报告和他的格式。

15.1 潮流工具条(Load Flow Toolbar)

输入潮流分析模式时，潮流工具条就会出现在屏幕上。

运行潮流计算

更新电缆负荷电流

潮流显示选项

报警

潮流报告管理器

中断当前计算

获取存档数据

获取在线数据

运行潮流计算(Run Load Flow Studies)

从分析案例编辑器中选择一个分析案例。然后单击 运行潮流计算按钮进行潮流分析。如果输出文件名设为 Prompt（提示的），则出现一个对话框，设定输出报告的名称。分析结果显示在单线图和输出报告上。

更新电缆负荷电流(Update Cable Load Current)

选择更新电缆负荷电流图标，将从正在运行的潮流分析中传送电缆负荷电流数据到与潮流分析相关的每条

电缆的电缆编辑器的运行负荷电流中。

潮流显示选项(Load Flow Display Options)

潮流分析的结果将显示在单线图中。点击潮流显示选项图标可进行编辑，更多信息参见潮流显示选项部分。

报警(Alert View)

在潮流分析之后，点击该按钮打开报警栏，栏中列出了已经不在边缘限制或临界限制的分析案例设定之内的设备。

潮流报告管理器(Load Flow Report Manager)

潮流输出报告有两种形式：ASCII 文本文件和 Crystal™报告。报告管理器为两种形式都提供了四种查看输出报告不同部分的选择：完整、输入、结果和总结。Crystal™ 报告的可用的格式显示在潮流分析报告管理器的每页上。

在报告管理器中选择任何非文本格式会激活 Crystal™ 报告。可根据选择的格式打开整个潮流输出报告或某个部分。格式名称和对应的输出报告部分如下：

- 阻抗 提供系统中阻抗设备的详细信息
- 支路 支路输入数据
- 母线 母线输入数据
- 电缆 电缆输入数据
- 完整 完整的输出报告包括所有的输入和输出
- 概述 输出报告的题头页
- 设备电缆 设备电缆输入数据
- 潮流报告 潮流计算结果
- 损耗 支路损耗结果
- 总结 潮流计算总结
- 变压器 变压器输入数据
- 电抗器 电抗器输入数据
- 支路负荷 支路负荷结果
- Undr/Over 欠压/过压报告
- 母线负荷 显示过载母线信息
- 报警—完整 提供完整的系统报警报告
- 报警—边缘 只提供边缘报警的总结
- 报警—临界 只提供临界报警的总结

也可通过点击分析案例工具条中的查看输出报告按钮来查看输出报告。所有所选程序地址中的输出文件都用于潮流计算。查看任何一个输出报告。点击输出报告名，然后点击查看输出报告按钮。

潮流文本输出报告的扩展名为 .lfr，可通过任何一种文字处理器进行查看，如记事本、写字板和 Word。普

遍输出报告的默认设定为记事本。可在 ETAPS.INI 文件中改变默认设定。

文本输出报告有 132 字幅宽，每页 66 行。想要改变输出报告的格式和分页，必须在您所用的文字处理器上改变默认设定。在“打印和图形”部分中对记事本、写字板和 Word 的格式应用作了推荐。

中断当前计算(Halt Current Calculation)

通常情况下停止图标是锁定的。当启动潮流计算时，该键激活并显红色。点击该键来中断当前计算。

获取在线数据(Get Online Data)

装有 PowerStation[®]在线能量管理系统，当系统监控在线时，点击该按键可采集实时数据。您会注意到运行负荷，母线电压和编辑器都被在线数据更新了。

获取存档数据(Get Archived Data)

装有 ETAPS 存档回放的系统，所有的图形显示都是回放形式，点击该按钮可以将这些数据传到您的图形显示中去并运行潮流分析。您会注意到：运行负荷，母线电压和编辑器都被存档数据更新了。

15.2 分析案例编辑器(Study Case Editor)

潮流分析案例编辑器包括精度控制变量、负荷条件、不同的输出报告选项等。在 PowerStation[®] 中可以创建无穷多个分析案例。“短路计算”根据工具条所选的分析案例的设定来计算并输出报告。在不同的分析案例之间可轻松切换无需每次重新设定选项。该功能可大大节省您的时间。

作为 PowerStation[®]三维数据库概念的一部分，分析案例可用于三个主要系统组成部分的任意组合，也就是适用于任何配置参数，单线图图形显示和基本/修正版本数据。

处于潮流分析时，在潮流分析案例工具条中点击“分析案例”就可以访问潮流分析案例编辑器了。也可以从项目视图中点击潮流 分析案例文件夹来访问该编辑器。

创建一个新的分析案例：进入项目视图，右击潮流分析案例文件夹文件夹，选择“新建”按钮。所创建的分析案例文件夹添加到潮流分析案例文件夹中，是默认分析案例文件的复制件。

15.2.1 信息页(Info Page)

分析案例文件夹标识(Study Case ID)

分析案例文件夹标识显示在输入区。删除旧的标识，输入新的就可以改变分析案例文件夹的名字了。分析案例文件夹标识 不超过 12 个字母，使用编辑器底部的浏览器，可以从一个案例切换到另一个案例。

方法(Method)

在本部分中选择一个潮流分析案例文件夹。有三种方法可选：牛顿-拉夫逊、快速解耦法和加速高斯—塞德尔法

注意：对于牛顿-拉夫逊方法，首先要进行一个牛顿-拉夫逊迭代来确定母线电压的初始值（因为牛顿-拉夫逊方法的收敛是建立在初始母线电压的基础上的）。

最大迭代次数(Maximum Iteration)

输入迭代次数的最大值。如果在达到设定的迭代次数后，精度仍无法收敛，则程序停止运行并通知用户。对于高斯-塞德尔方法推荐值是 2000，对于牛顿-拉夫逊法 和快速解耦方法推荐值是 5。

精度(Precision)

输入参数的精度值，用于检验该精度的收敛度。该值决定了您想要最终结果精确到什么程度。对于高斯-塞德尔方法，精度用于在每次迭代之后检查母线电压之间的差距。对于牛顿-拉夫逊和快速解耦方法，精度用于比较不同迭代之间每条母线的功率差。如果迭代之间的差小于或等于输入的精度值，则要求的精度就达到了。

如果求解是收敛的，但失谐值过大，要减小精度值来使您的结果更精确，然后再运行一遍程序。注意：精度值越小，失谐值也越小，精确度就越高，运行时间会越长。对于高斯-塞德尔方法，默认值为 0.000001（电压标么值），对于牛顿-拉夫逊和快速解耦算法默认值为.001（功率标么值）。

加速因数(Acceleration Factor)

如果使用加速高斯-塞德尔方法，显示该区域。输入迭代间的收敛加速因数。典型值在 1.2 和 1.7 之间，默认值为 1.45。

应用变压器相移(Apply XFMR Phase-Shift)

选中该复选框在潮流计算中考虑到变压器的相移。可在变压器编辑器中找到变压器的相移。

计算配电板系统 (Calc. Panel Systems)

点击这个选项，则系统在进行潮流计算的时候，会包含配电板系统的计算。配电板系统可以定义为放射型的子系统，通过主配电板或者移相适配器联接到三相系统中。电力系统可以包含多个配电板系统，每一个配电板系统或者是三相配电板，或者是通过称相适配器相联接。

选择这个选项，在潮流计算中将计算配电板系统的母线电压和支路潮流，并且计算的结果将显示在单线图和报告中。如果不选这个选项，在分析中每一个配电板系统的负荷将考虑为主配电板的整体负荷，负荷总和基于系统的额定电压，不考虑任何支路损耗。主配电板作为系统中的一个独立负荷。

配电板系统可以是一个放射型的系统，ETAP® PowerStation®在进行潮流计算时，在配电板系统中检查是否是环型配置，如果是，则停止潮流计算，并给出相关信息。

负荷>Loading)

在潮流分析案例文件夹编辑器的负荷部分，可以通过选择负荷类型和变化因数（可变的或固定的）来定义运行负荷。

A1.2 Load Flow Analysis

The ETAP Load Flow Analysis module calculates the bus voltages , branch power factors , currents , and power flows throughout the electrical system . ETAP allows for swing , voltage regulated , and unregulated power sources with multiple power grids and generator connections . It handles both radial and loop systems . Different methods are provided for you to select from in order to achieve the best calculation efficiency .

This chapter defines definitions and explains the usage of different tools you will need to run load flow

studies . Theoretical background for different load flow calculation methods is also provided.

The Load Flow Toolbar section explains how you can launch a load flow calculation , open and view an output report , or select display options . The Load Flow Study Case Editor section explains how can you create a new study case , what parameters are required to specify a study case , and how to set them . The Display Options section explains what options are available for displaying some key system parameters and the output results on the one-line diagram , and how to set them . The Load Flow Calculation Methods section shows formulations of different load flow calculation methods . comparisons on their rate of convergence , improving convergence based on different system parameters and configurations , and some tips on selecting an appropriate calculation method are also found in this section . The Required Data for Calculations section describes what data is necessary to perform load flow calculations and where to enter them . Finally , the Load Flow Study Output Report section illustrates and explains output reports and their format .

15.1 Load Flow Toolbar

The load Flow toolbar will appear on the screen when you are in the Load Flow Study mode .

Run Load Flow Studies

Run Control Auto Simulator

Load Flow Display Options

Alert View

Load Flow Report Manage

Halt Current Calculation

Get Online Data

Get Archived Data

Run Load Flow Studies

Select a study case from the Study Case Editor . Then click on the Run Load Flow Study icon to perform a load flow study . A dialog box will appear to specify the output report name if the output file name is set to Prompt . The study results will then appear on the one-line diagram and in the output report .

Run Control Auto Simulator

The control Auto Simulator capability allows the ETAP program to generate operating values and emergency conditions of a power system and feeds the information to actual control systems of generators . From the Emergency page of the Load Flow Study Case , you can specify emergency conditions to be simulated , including generator governor and exciter control modes and associated causes as well as circuit breaker status changes and associated causes . This feature can be used to test and tune the setting and reaction time of the physical control systems of your generators . ETAP Real-Time is needed in order to enable this feature .

Load Flow Display Options

The results from load flow studies are displayed on the one-line diagram . To edit how these results look , click on the Load Flow Display Option icon . For more information see Load Flow Display Options .

Alert View

After performing a load flow study , you can click on this button to open the Alert View , which lists all equipment with critical and marginal violations based on the settings in the study case .

Load Flow Report Manager

Load flow output reports are provided in the form of a Crystal Report . The Report Manager provides four pages (Complete , Input , Result , and Summary) for viewing the different parts of the output report for Crystal Reports . Available formats for Crystal Reports are displayed in each page of the Report Manager for load flow studies .

Choosing any format in the Report Manager activates the Crystal Reports . You can open the whole load flow output report or only a part of it , depending on the format selection . The format names and corresponding output report sections are given below .

• Adjustments	Indicates tolerance and temperature correction adjustments
• Alert-Complete	Provides complete report of system alerts
• Alert-Critical	Provides summary of critical alerts only
• Alert-Marginal	Provides summary of marginal alerts only
• Branch Loading	Branch loading results
• Branch	Branch input data
• Bus Loading	Display overloaded bus information
• Bus	Bus input data
• Cable	Cable input data
• Complete	Complete output report including all input and output
• Cover	Title page of the output report
• Equipment Cable	Equipment cable input data
• High Voltage DC Link	High Voltage DC Link input data
• Impedance	Provides detailed information about impedance elements in the system
• Line Coupling	Displays Transmission Line coupling impedance data
• Load Flow Report	Load Flow calculation results
• Losses	Branch loss results
• NO Protective Devices	Displays Normally Open protective devices
• Panel Report	Load Flow calculation results for panel syetems
• Reactor	Reactor input data

- | | |
|---------------|---|
| • Summary | Summary of load flow calculation |
| • SVC | Static Var Compensator (SVC) input data |
| • Transformer | Transformer input data |
| • UPS Report | Load Flow calculation results for UPS systems |

You can also view output reports by clicking on the View Output Report button on the Study Case toolbar . A list of all output files in the selected project directory is provided for load flow calculations . To view any of the listed output reports , click on the output report name , and then click on the View Output Report button .

Halt Current Calculation

The Stop Sign button is normally faded-out . When a Load Flow calculation has been initiated , this button becomes enabled and shows a red stop sign . Clicking on this button will terminate the calculation .

Get Online Data

When ETAP Real-Time is set up and the Sys Monitor presentation is online , you can bring real-time data into your offline presentation and run a load Flow by pressing on this button . You will notice that the Operating Loads , Bus Voltages , and Study Case editor will be updated with the online data .

Get Archived Data

When ETAP Playback is set up and any presentation is on Playback mode , you can bring this data into your presentation and run a Load Flow by pressing on this button . You will notice that the Operating Loads , Bus Voltages , and Study Case editor will be updated with the playback data .

15.2 Study Case Editor

The Load Flow Study Case editor contains solution control variables , loading conditions , and a variety of options for output reports . ETAP allows you to create and save an unlimited number of study cases selected in the toolbar . You can easily switch between study cases without the trouble of resetting the study case options each time . This feature is designed to organize your study efforts and save you time .

As a part of the multi-dimensional database concept of ETAP , study cases can be used for any combination of the three major system toolbar components , i.e. for any configuration status , one-line diagram presentation , and Base/Revision data .

When you are in Load Flow Analysis mode , you can access the Load Flow Study Case editor by clicking on the Study Case button from the Load Flow Study Case toolbar . You can also access this editor from the Project View by clicking on the Load Flow Study Case folder .

There are two ways you can create a new study case . You can click on the New Study Case button in the Study Case toolbar , as shown above . It will open the Duplicate Study Case dialog box for you to specify names of an existing Study Case and the new study case you want to create .

You can also create a new study case from the Project View , by right-clicking on the Load Flow Study Case

folder and selecting Create New . ETAP will then create a new study case , which is a copy of the default study case , and adds it to the Load Flow Study Case folder .

15.2.1 Info Page

Study Case ID

Study case ID shown in this entry field . You can rename a study case by deleting the old ID and entering the new ID . Study case ID can be up to 12 alphanumeric characters . Use the Navigator button at the bottom of the editor to go from one study case to the next existing study case .

Method

In this group you can select a load flow solution method . three methods are available : Newton-Raphson , Fast-decoupled , and Accelerated Gauss-Seidel .

For the Newton-Raphson , a few Gauss-Seidel iterations are made first to establish a set of sound initial values for the bus voltages (since convergence of the Newton-Raphson method is highly dependent on the initial bus voltages) .

Max.Iteration

Enter the maximum number for iterations . If the solution has not converged before the specified number of iterations , the program will stop and inform the user . The recommended and default values are 2000 for the Gauss-Seidel method , and five for the Newton-Raphson and Fast-Decoupled methods .

Precision

Enter the value for the solution precision , which is used to check for convergence . This value determines how precise you want the final solution to be . For the Gauss-Seidel method , precision is applied to check the difference between the bus voltages after each iteration . For the Newton-Raphson and Fast-Decoupled methods , the precision is compared with the difference in power for each bus (MW and Mvar) between iterations . If the difference between the iterations is less than or equal to the value entered for precision , the desired accuracy is achieved .

If the solution converges but the mismatch values are high , reduce the value of the precision to make your results more precise and run the program again (you may need to increase the number of iterations) . Note that a smaller precision value results in lower mismatch (higher accuracy) , as well as a longer run time . The default (and recommended) values are 0.000001 pu volts for the Gauss-Seidel method , and .0001 pu power for the Newton-Raphson and Fast-Decoupled methods .

Accelerated Gauss-Seidel

This field is present if the Accelerated Gauss-Seidel method is used . Enter the convergence acceleration factor to be use between iterations . Typical values are between 1.2 and 1.7 ; the default is 1.45 .

Apply XFMR Phase-Shift

Check this box to consider transformer phase-shift in load flow calculations . The phase-shift of a transformer can be found in the transformer editor .

Calc.Panel/UPS Systems

Check this box to include panel and /or UPS system load flow calculations as part of the whole system load flow calculation . A panel/UPS system is defined as a radial sub-system that is powered through a top panel , UPS , or a phase adaptor connected to a 3-phase bus . A power system may contain several panel/UPS systems . Each panel/UPS system has a top element that is either a 3-phase panel , 3-phase UPS , or a phase adapter .

If this box is checked , bus voltages and branch flows in panel/UPS systems will be calculated in a load flow run and calculation results will be reported in the one-line diagram and the crystal report . If this box is not checked , the load for each panel/UPS system will be summed up to its top element for the loading specified in the study case . This load summation is based on the load rated voltage and does not consider any branch losses . The top element will be treated as a single load in the system .

The panel/UPS system must be a radial system . ETAP checks loop configurations in panel/UPS systems when performing load flow calculations . Should a loop configuration be detected , the load flow calculation will be terminated and a message will be posted .

附录 2：短路计算

A2.1 短路阻抗计算

A 2.1.1 各元件参数的标么值计算

$$S_B = 1000 \text{MVA}, U_B = U_{av}$$

A 2.1.1.1 220kV 系统

(1) L₁ 侧系统阻抗

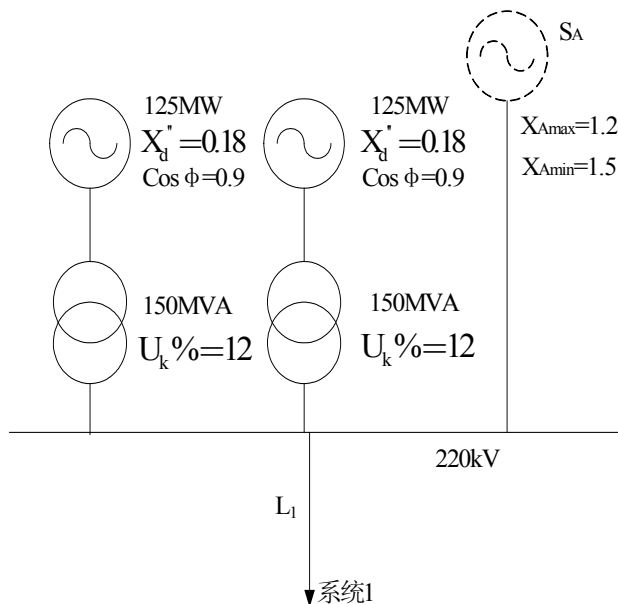


图 A2.1 L₁ 所接 220kV 系统

$$X_F = X_d' \frac{S_B}{S_N} = 0.18 \frac{1000}{125/0.9} = 1.296$$

$$X_T = U_k \% \frac{S_B}{100 S_N} = 12 \times \frac{1000}{100 \times 150} = 0.8$$

正序大方式为两个发电机同时运行：

$$X_{1.S1.max} = [(X_F + X_T)/2] // X_{Amax} = [(1.296 + 0.8)/2] // 1.2 = 0.56$$

正序小方式为单个发电机运行：

$$X_{1.S1.min} = (X_F + X_T) // X_{Amin} = (1.296 + 0.8) // 1.5 = 0.87$$

变压器的正序阻抗和零序阻抗一样，线路的零序阻抗是正序阻抗的 3 倍。系统的零序阻抗是正序阻抗的 2.5 倍

$$\text{零序大方式： } X_{0.S1.max} = \frac{X_T}{2} // 2.5 X_{Amax} = 0.4 // 3 = 0.35$$

$$\text{零序小方式： } X_{0.S1.min} = X_T // 2.5 X_{Amin} = 0.8 // 3.75 = 0.66$$

(2) L₂ 侧系统阻抗：

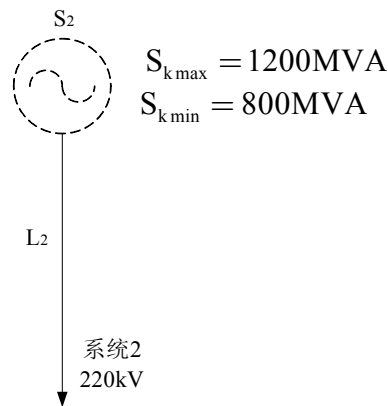


图 A2.2 L₂ 所接 220kV 系统

$$X_{1.S2.max} = \frac{S_B}{S_{kmax}} = \frac{1000}{1200} = 0.83$$

$$X_{1.S2.min} = \frac{S_B}{S_{kmin}} = \frac{1000}{800} = 1.25$$

$$X_{0.S2.max} = 2.5 X_{1.S2.max} = 2.5 \times 0.83 = 2.08$$

$$X_{0.S2.min} = 2.5 X_{1.S2.min} = 2.5 \times 1.25 = 3.13$$

A 2.1.1.2 110kV 系统

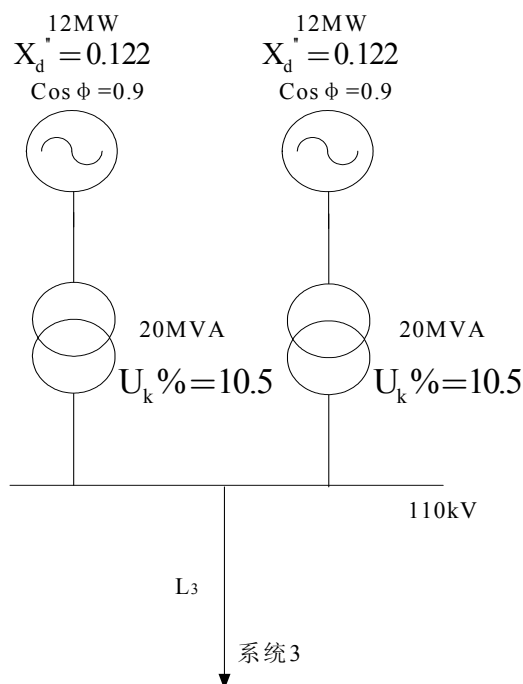


图 A2.3 L_3 所接系统

$$X_F = X_d'' \frac{S_B}{S_N} = 0.122 \times \frac{1000}{12/0.9} = 9.15$$

$$X_T = U_k \% \frac{S_B}{100 S_N} = 10.5 \times \frac{1000}{100 \times 20} = 5.25$$

L_3 侧系统的正序阻抗:

正序最大运行方式:

$$X_{1.S3.max} = (X_F + X_T)/2 = (9.15 + 5.25)/2 = 7.2$$

正序最小运行方式:

$$X_{1.S3.min} = X_F + X_T = 14.4$$

110kV 线路的系统变压器不接地, 无零序阻抗。

A 2.1.1.3 变压器阻抗计算

参数: 型号: SFPSZ10-120000/220;

接线方式: YN,yn,d 接线;

短路电抗: $U_{k12} \% = 13$, $U_{k13} \% = 23$, $U_{k23} \% = 8$;

$$U_{k1} \% = \frac{1}{2}(U_{k12} \% + U_{k13} \% - U_{k23} \%) = \frac{1}{2}(13 + 23 - 8) = 14$$

$$U_{k2}\% = \frac{1}{2}(U_{k12}\% + U_{k23}\% - U_{k13}\%) = \frac{1}{2}(13 + 8 - 23) = -1$$

$$U_{k3}\% = \frac{1}{2}(U_{k13}\% + U_{k23}\% - U_{k12}\%) = \frac{1}{2}(23 + 8 - 13) = 9$$

A 2.1.1.4 线路阻抗计算

(1) 线路 L1 LGJQ-400/86.8km $x_1=0.4$

$$X_{1.L1} = x_1 l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 86.8 \times \frac{1000}{230^2} = 0.66$$

$$X_{0.L1} = 3 X_{1.L1} = 1.97$$

(2) 线路 L2 LGJQ-400/79.7km $x_1=0.4$

$$X_{1.L2} = x_1 l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 79.7 \times \frac{1000}{230^2} = 0.60$$

$$X_{0.L2} = 3 X_{1.L2} = 1.81$$

(3) 线路 L3 LGJ-150/43.7km $x_1=0.4$

$$X_{1.L3} = x_1 l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 43.7 \times \frac{1000}{115^2} = 1.32$$

$$X_{0.L3} = 3 X_{1.L3} = 3.96$$

表 A2.1 正序电抗值计算结果

名称	符号	电抗编号	基础参数	标么值
系统 1 (220kV)	S1	$X_{1.S1.min}$ 、 $X_{1.S1.max}$	$X_{Amax}=1.2$, $X_{Amin}=1.5$ 125MW×2 发电厂	$X_{1.S1.min}=0.87$ $X_{1.S1.max}=0.56$
系统 2 (220kV)	S2	$X_{1.S2.min}$ $X_{1.S2.max}$	最大运方短路功率为 1200MVA, 最小运方短路功率 为 800MVA	$X_{1.S1.min}=1.25$ $X_{1.S1.max}=0.83$
系统 3 (110kV)	S3	$X_{1.S3.max}$ $X_{1.S3.min}$	12MW×2 发电厂	$X_{1.S3.max}=7.2$ $X_{1.S3.min}=14.4$
变压器高压侧	T. h	$X_{1.T.h}$	120MVA、 $U_{k1}\%=14\%$ 。	$X_{1.T.h}=1.17$
变压器中压侧	T. m	$X_{1.T.m}$	120MVA; $U_{k1}\%=-1\%$ 。	$X_{1.T.m}=0$
变压器低压侧	T. l	$X_{1.T.l}$	60MVA; $U_{k1}\%=9\%$	$X_{1.T.l}=0.75$
线路 1 (220kV)	L1	$X_{1.L1}$	86.8km, 0.4 欧/公里, 单回路。	$X_{1.L1}=0.66$

线路 2 (220kV)	L2	$X_{1.L2}$	79.7km, 0.4 欧/公里, 单回路	$X_{1.L2}=0.60$
线路 3 (110kV)	L3	$X_{1.L3}$	43.7km,0.4 欧/公里, 单回路	$X_{1.L3}=1.32$

表 A2.2 零序电抗值计算结果

名称	符号	电抗编号	基础参数	标么值
系统 1 (220kV)	S1	$X_{0.S1.max} X_{0.S1.min}$	$X_{Amax}=1.2, X_{Amin}=1.5$ 150MW×2 变压器组	$X_{0.S1.max}=0.35$ $X_{0.S1.min}=0.66$
系统 2 (220kV)	S2	$X_{0.S2.max} X_{0.S2.min}$	最大运方短路功率为 1200MVA, 最小运方短路功 率为 800MVA	$X_{0.S2.max}=2.08$ $X_{0.S2.min}=3.13$
线路 1 (220kV)	L1	$X_{0.L1}$	86.8km, 1.2 欧/公里, 单回 线路。	$X_{0.L1}=1.97$
线路 2 (220kV)	L2	$X_{0.L2}$	79.7km, 1.2 欧/公里, 单回 线路	$X_{0.L2}=1.81$
线路 2 (110kV)	L3	$X_{0.L3}$	43.7km, 1.2 欧/公里, 单回 线路	$X_{0.L3}=3.96$

变压器零序阻抗与正序阻抗相同。

A 2.1.2 各短路点的序阻抗计算

A 2.1.2.3 K1 点故障时各序阻抗的化简

(1)正序大方式

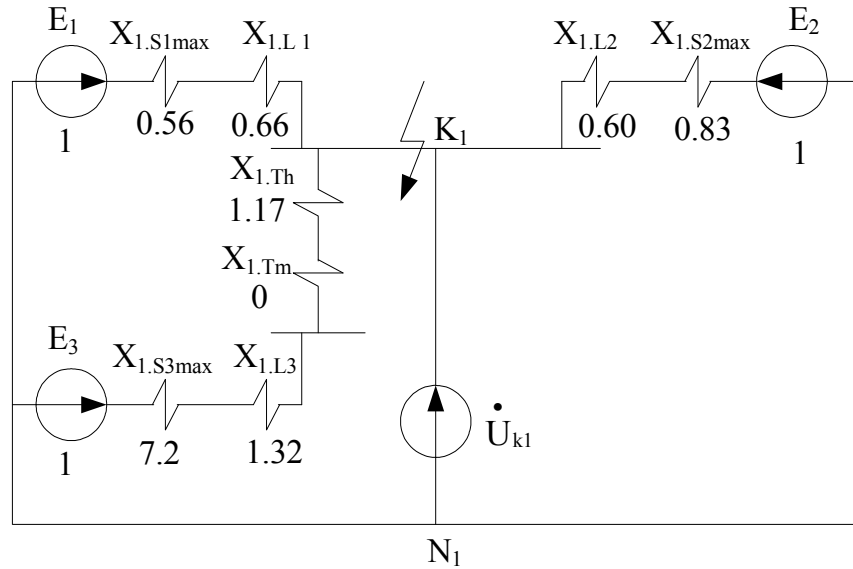


图 A2.4 K1 点正序大方式图

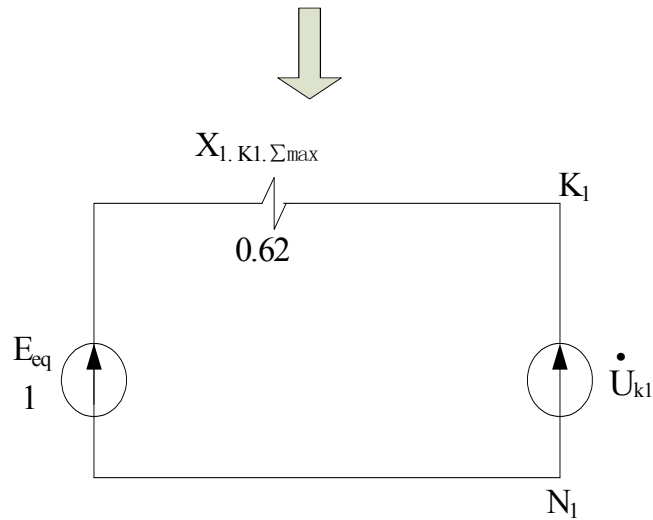


图 A2.5 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{1.K1.\Sigma\max} &= (X_{1.S1\max} + X_{1.L1}) // (X_{1.S3\max} + X_{1.L3} + X_{1.Tm} + X_{1.Th}) // (X_{1.S2\max} + X_{1.L2}) \\
 &= (0.56 + 0.66) // (7.2 + 1.32 + 0 + 1.17) // (0.83 + 0.60) = 0.62
 \end{aligned}$$

(2)正序小方式

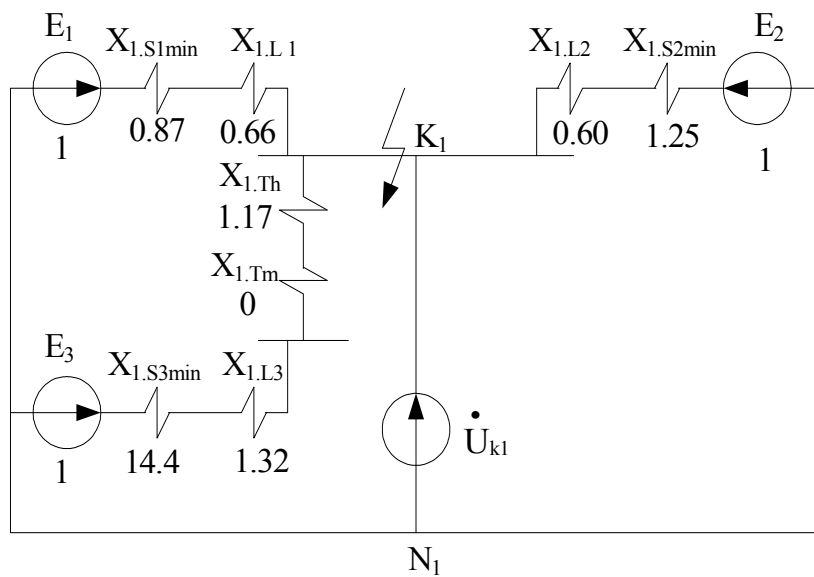


图 A2.6 K1 点正序小方式图

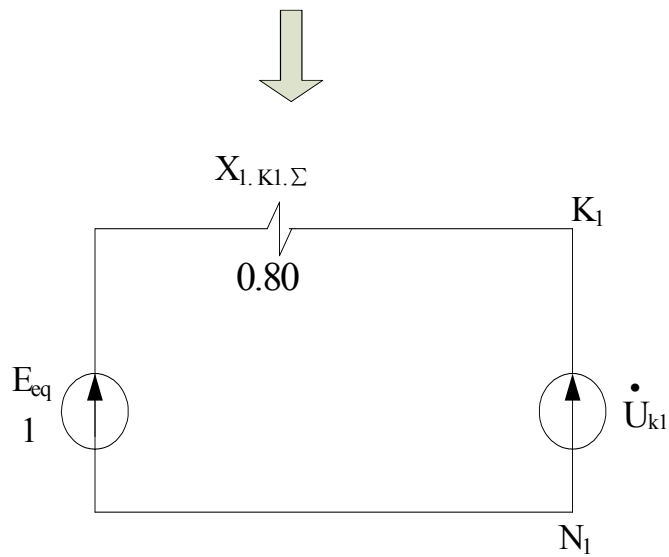


图 A2.7 化简图

$$X_{1, K1, \Sigma \min} = (X_{1.S1\min} + X_{1.L1}) // (X_{1.S3\min} + X_{1.L3} + X_{1.Tm} + X_{1.Th}) // (X_{1.S1\min} + X_{1.L1})$$

$$= (0.87 + 0.66) // (14.4 + 1.32 + 0 + 1.17) // (0.60 + 1.25) = 0.80$$

(3) 零序大方式

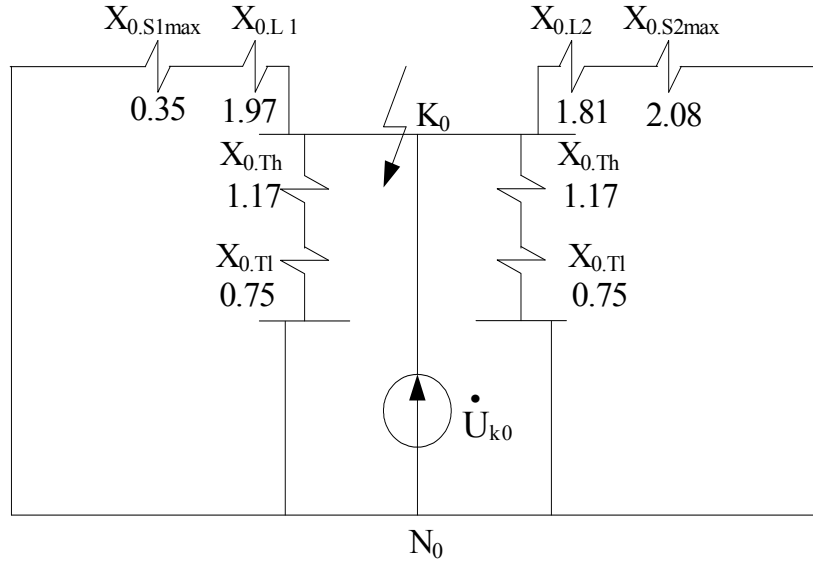


图 A2.8 K1 点零序大方式图

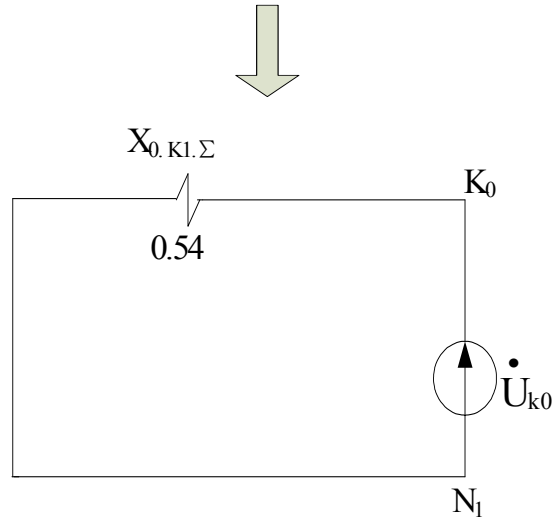


图 A2.9 化简图

$$X_{0.K1.\Sigma \max} = (X_{0.S1\max} + X_{0.L1}) // (X_{0.S2\max} + X_{0.L2}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl})$$

$$= (0.35 + 1.97) // (2.08 + 1.81) // (1.17 + 0.75) // (1.17 + 0.75) = 0.54$$

$$X_{0.K1.\Sigma R} = (X_{0.S1\max} + X_{0.L1}) // (X_{0.S2\max} + X_{0.L2}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl})$$

$$= (0.35 + 1.97) // (2.08 + 1.81) // (1.17 + 0.75) = 1.12$$

$$X_{0.K1.\Sigma L} = X_{0.Th} + X_{0.Tl} = 1.17 + 0.75 = 1.92$$

$$1^{\#} \text{主变分支系数 } C_{om.K1} = X_{0.K1.\Sigma R} / (X_{0.K1.\Sigma R} + X_{0.K1.\Sigma L}) = 1.12 / (1.12 + 1.92) = 0.37$$

(4)零序小方式

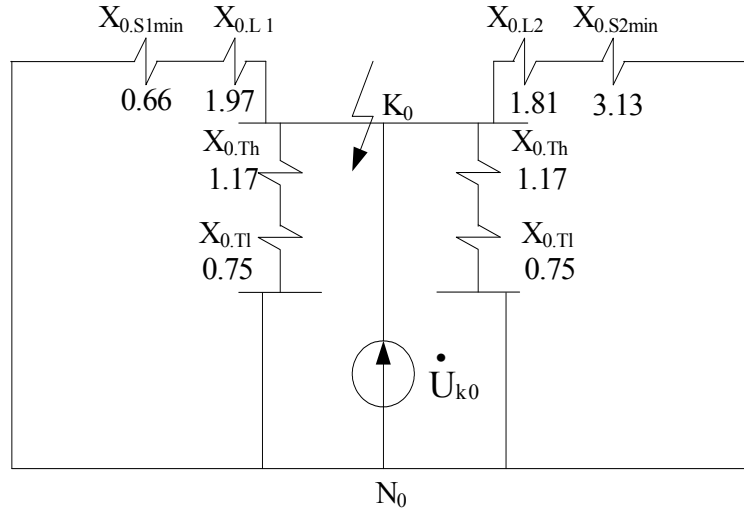


图 A2.10 K1 点零序小方式图

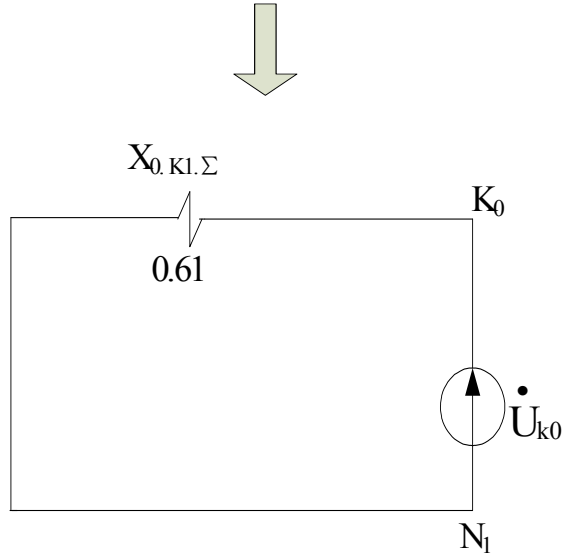


图 A2.11 化简图

$$X_{0.K1.\Sigma \min} = (X_{0.S1\max} + X_{0.L1}) // (X_{0.S2\max} + X_{0.L2}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) \\ = (0.66 + 1.97) // (3.13 + 1.81) // (1.17 + 0.75) // (1.17 + 0.75) = 0.61$$

$$X_{0.K1.\Sigma R} = (X_{0.S1\min} + X_{0.L1}) // (X_{0.S2\min} + X_{0.L2}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) \\ = (0.66 + 1.97) // (3.13 + 1.81) // (1.17 + 0.75) = 1.21$$

$$X_{0.K1.\Sigma L} = X_{0.Th} + X_{0.Tl} = 1.17 + 0.75 = 1.92$$

$$1^{\#} \text{主变分支系数 } C_{om.K1} = X_{0.K1.\Sigma R} / (X_{0.K1.\Sigma R} + X_{0.K1.\Sigma L}) = 1.21 / (1.21 + 1.92) = 0.41$$

A 2.1.2.4 K2 点故障时各序阻抗的化简

(1)正序大方式

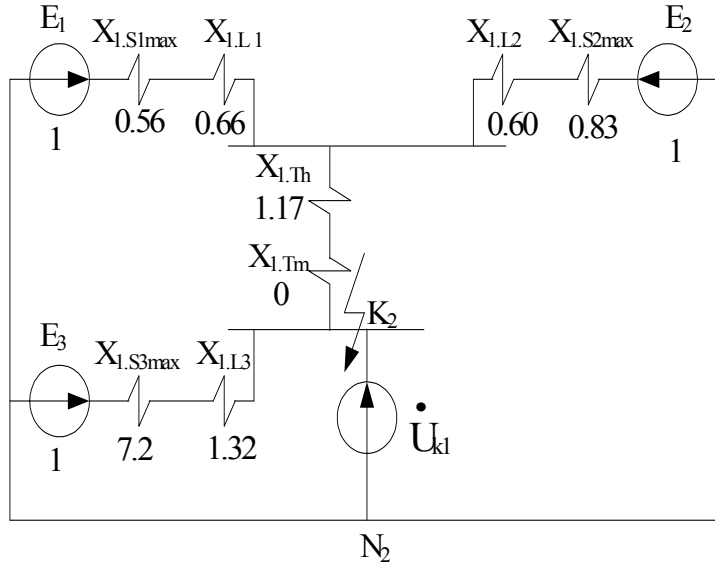


图 A2.12 K2 点正序大方式图

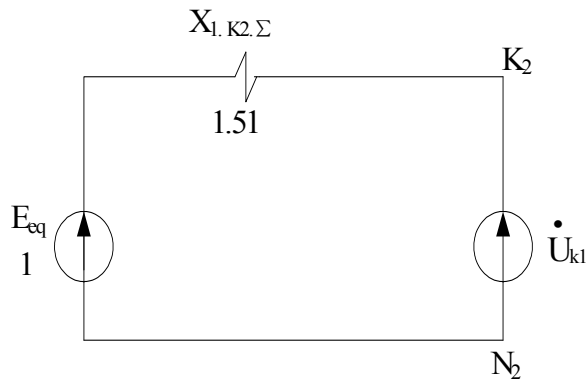
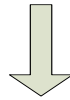


图 A2.13 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{0\ K2\Sigma\max} &= [(X_{1.S1\max} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\max} + X_{1.L2}) + X_{1.Tm} + X_{1.Th}] // (X_{1.S3\max} \\
 &\quad + X_{1.L3}) \\
 &= [(0.56 + 0.66) // (0.83 + 0.60) + 0 + 1.17] // (7.2 + 1.32) = 1.51
 \end{aligned}$$

(2)正序小方式

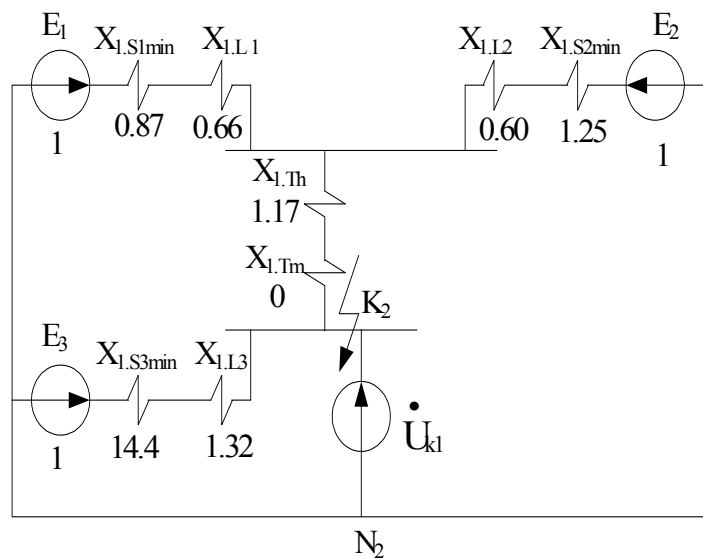


图 A2.14 K2 点正序小方式图

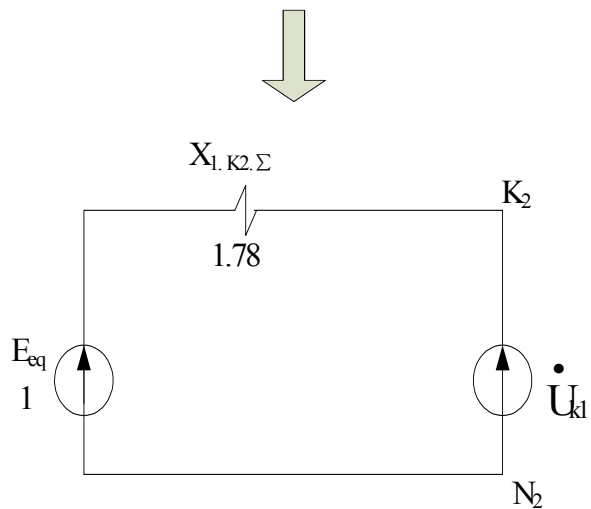


图 A2.15 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{1\ K2\Sigma\min} &= [(X_{1.S1\min} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\min} + X_{1.L2}) + X_{1.Tm} + X_{1.Th}] // (X_{1.S3\min} \\
 &\quad + X_{1.L3}) \\
 &= [(0.87 + 0.66) // (1.25 + 0.60) + 0 + 1.17] // (14.4 + 1.32) = 1.78
 \end{aligned}$$

(3) 零序大方式

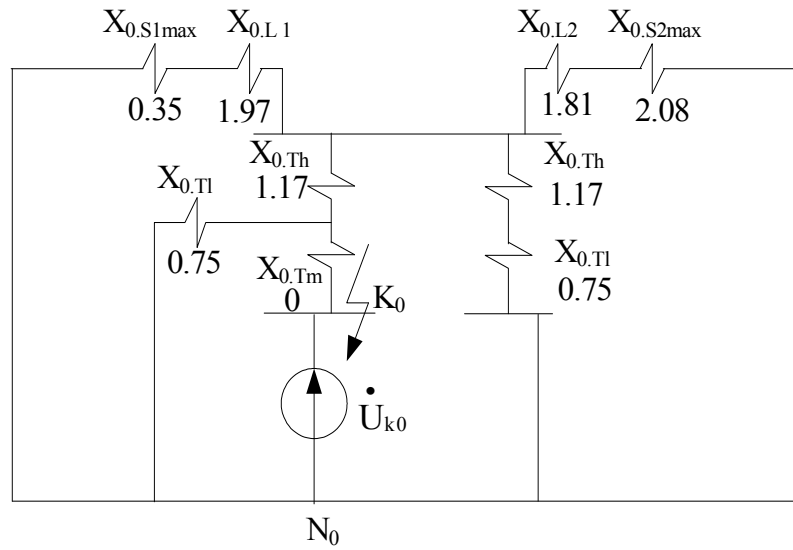


图 A2.16 K2 点零序大方式图

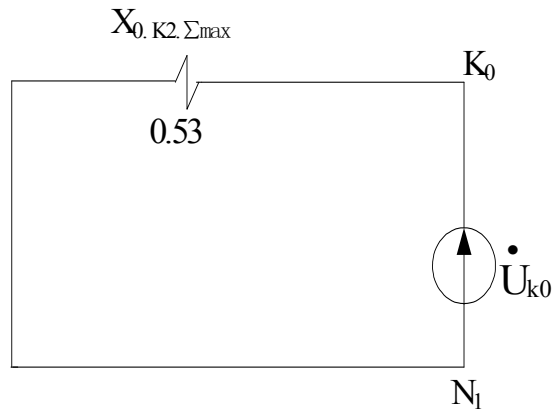


图 A2.17 化简图

$$X_{0.K2.\Sigma max} = [(X_{0.L2} + X_{0.S2max}) // (X_{0.Th} + X_{0.T1}) // (X_{0.L1} + X_{0.S1max}) + X_{0.Th}] // X_{0.T1} + X_{0.Tm}$$

$$= [(1.81 + 2.08) // (1.17 + 0.75) // (1.97 + 0.35) + 1.17] // 0.75 + 0 = 0.53$$

1[#]主变 110kV 侧所接系统不接地，零序分支系数为 1。

(4)零序小方式

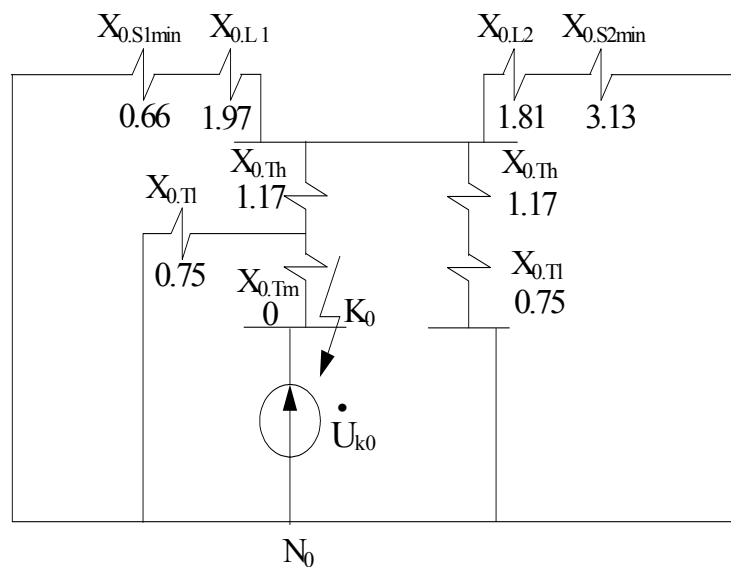


图 A2.18 K2 点零序小方式图

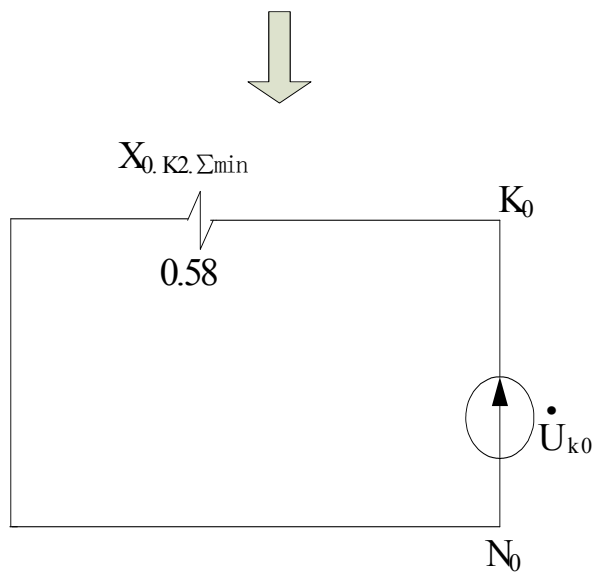


图 A2.19 化简图

$$X_{0.K2.\Sigma\min} = [(X_{0.L2} + X_{0.S2\min}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl})] // [(X_{0.L1} + X_{0.S1\min}) + X_{0.Th}] // X_{0.Tl} + X_{0.Tm}$$

$$= [(1.81 + 3.13) // (1.17 + 0.75)] // [(1.97 + 0.66) + 1.17] // 0.75 + 0 = 0.58$$

1[#]主变 110kV 侧所接系统不接地，零序分支系数为 1。

A 2.1.2.5 K3 点故障时各序阻抗的化简

(1) 正序大方式

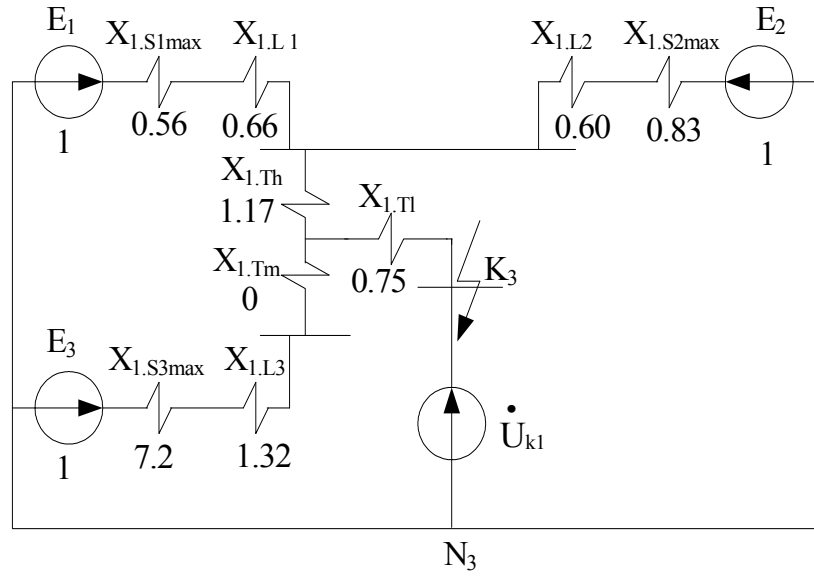


图 A2.20 K3 点正序大方式图

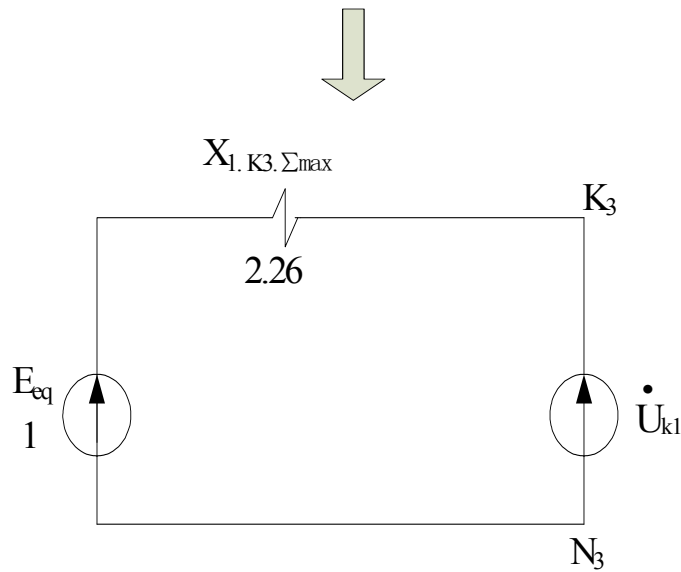


图 A2.21 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{1.K3.\Sigma\max} &= [(X_{1.S1\max} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\max} + X_{1.L2}) + X_{1.Th}] // [(X_{1.S3\max} + X_{1.L3} + X_{1.Tm}) + X_{1.Tl}] \\
 &= [(0.56 + 0.66) // (0.83 + 0.60) + 1.17] // (7.2 + 1.32 + 0) + 0.75 = 2.26
 \end{aligned}$$

(2)正序小方式

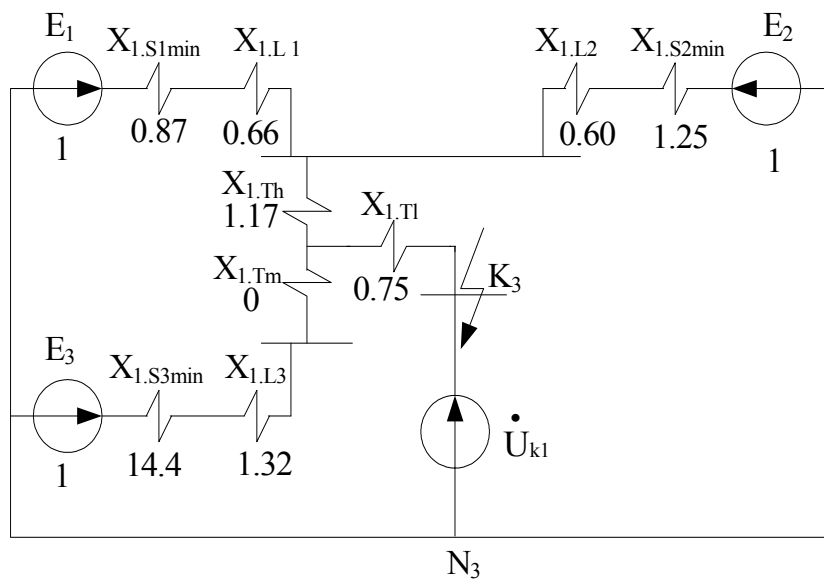


图 A2.22 K3 点正序小方式图

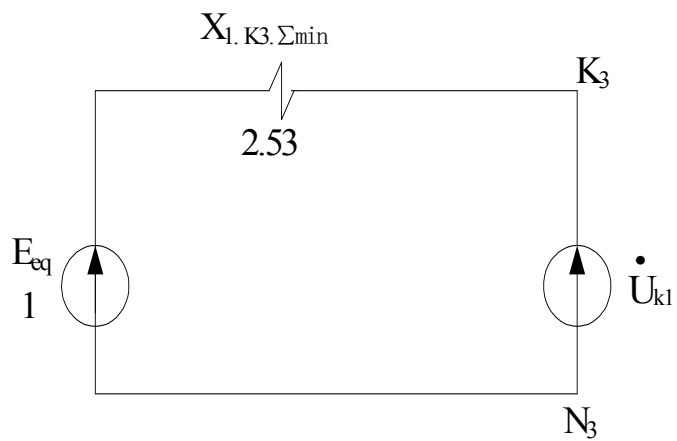


图 A2.23 化简图

$$X_{1.K3.\Sigma\min} = [(X_{1.S1\min} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\min} + X_{1.L2}) + X_{1.Th}] // (X_{1.S3\min} + X_{1.L3} + X_{1.Tm}) + X_{1.Tl}$$

$$= [(0.87 + 0.66) // (1.25 + 0.60) + 1.17] // (14.4 + 1.32 + 0) + 0.75 = 2.53$$

A 2.1.2.6 线路 L2 末端 K4 点故障时各序阻抗的化简

(1) 零序大方式

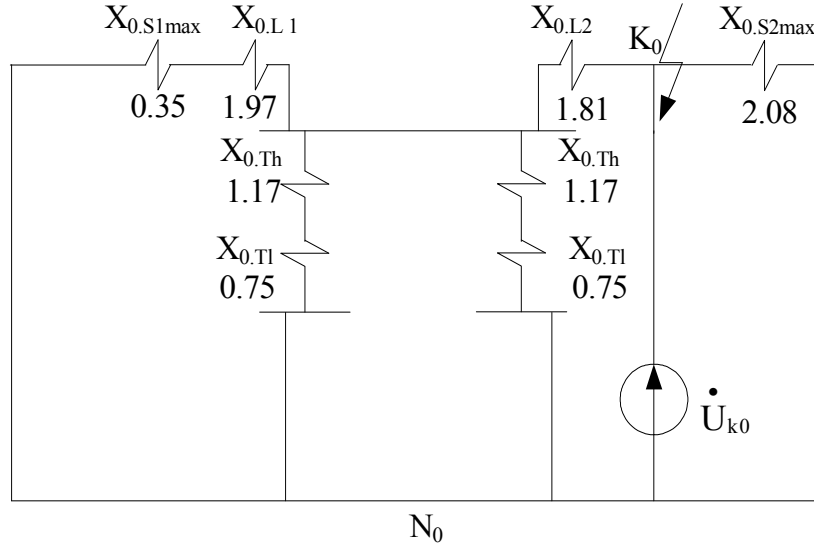


图 A2.24 K4 点零序大方式图

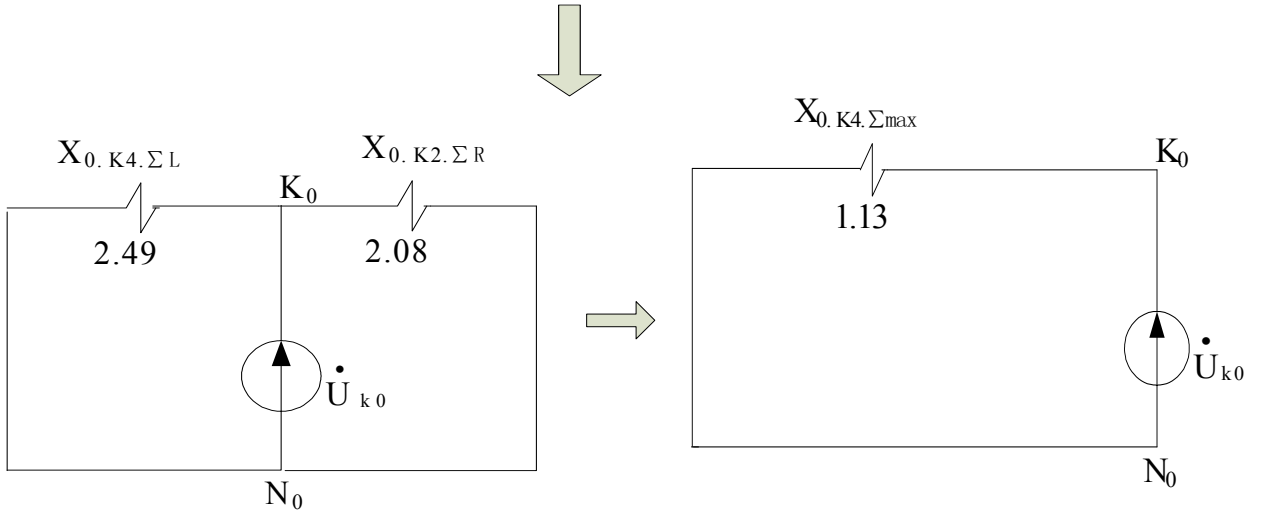


图 A2.25 初步化简图

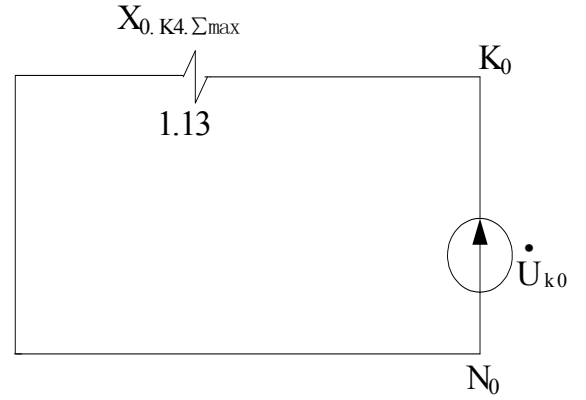


图 A2.26 最终化简图

$$X_{0.K4.\Sigma L} = (X_{0.S1max} + X_{0.L1}) // (X_{0.Th} + X_{0.T1}) // (X_{0.Th} + X_{0.T1}) + X_{0.L2}$$

$$= (0.35 + 1.97) // (1.17 + 0.75) // (1.17 + 0.75) + 1.81 = 2.49$$

$$X_{0.K4.\Sigma max} = X_{0.K4.\Sigma L} // X_{0.K2.\Sigma R} = 1.13$$

$$\text{系统左侧分流系数 } C_{0M} = 2.08 / (2.08 + 2.49) = 0.43$$

(2)零序小方式

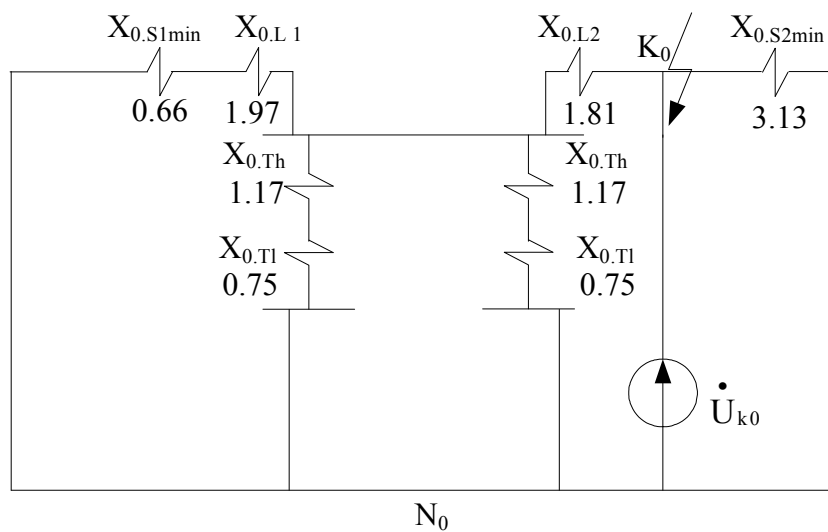


图 A2.27 K4 点零序小方式图

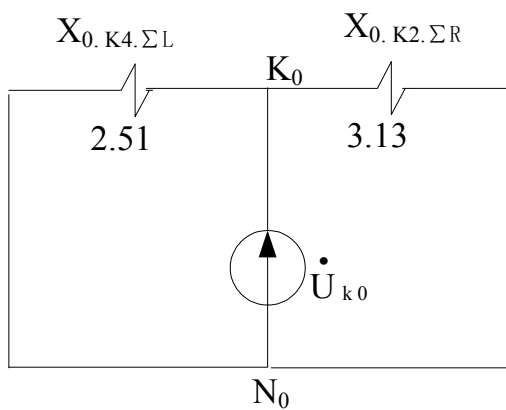


图 A2.28 初步化简图

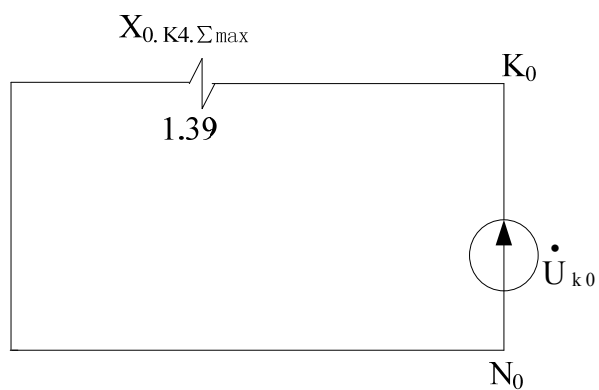


图 A2.29 最终化简图

$$X_{0.K4.\Sigma L} = (X_{0.S1min} + X_{0.L1}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) + X_{0.L2} \\ = (0.66 + 1.97) // (1.17 + 0.75) // (1.17 + 0.75) + 1.81 = 2.51$$

$$X_{0.K4.\Sigma min} = X_{0.K4.\Sigma L} // X_{0.K4.\Sigma R} = 1.39$$

系统左侧分流系数 $C_{0M} = 3.13 / (3.13 + 2.51) = 0.49$

(3)正序大方式

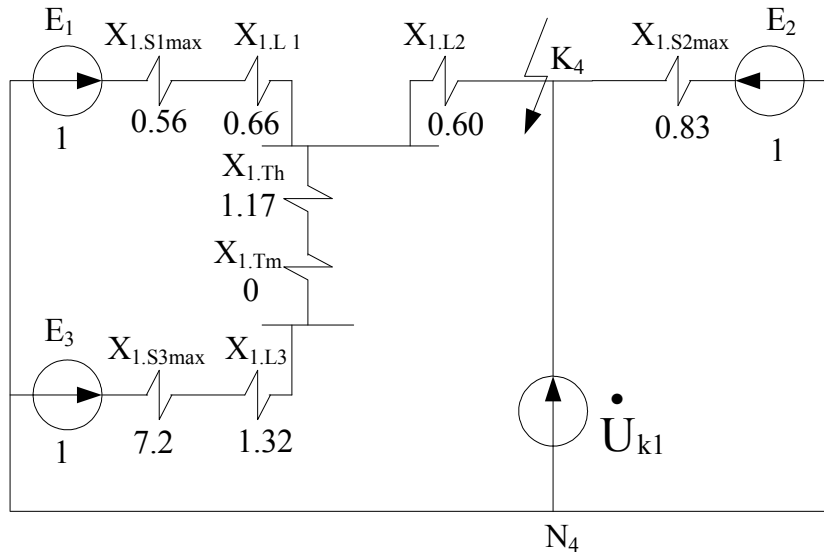


图 A2.30 K4 点正序大方式图

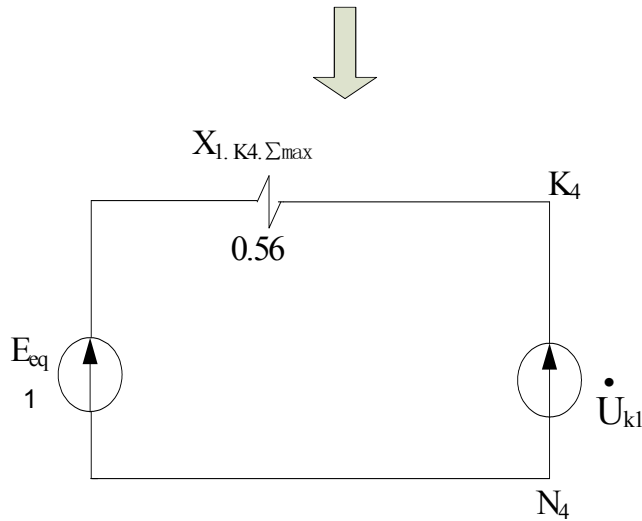


图 A2.31 化简图

$$X_{1.K4.\Sigma \max} = [(X_{1.S1\max} + X_{1.L1}) // (X_{1.S3\max} + X_{1.L3} + X_{1.Tm} + X_{1.Th}) + X_{1.L2}] // X_{1.S2\max}$$

$$= [(0.56 + 0.66) // (7.2 + 1.32 + 0 + 1.17) + 0.60] // 0.83 = 0.56$$

(4)正序小方式

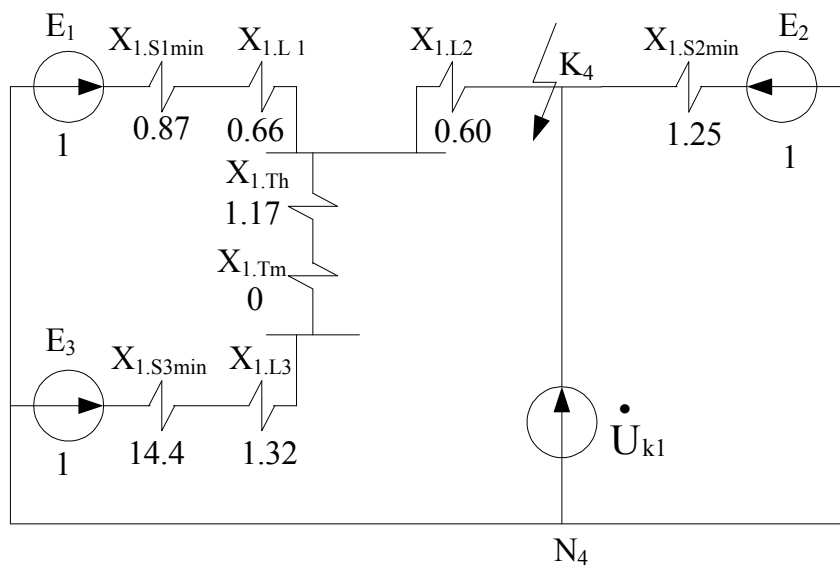


图 A2.32 K4 点正序小方式图

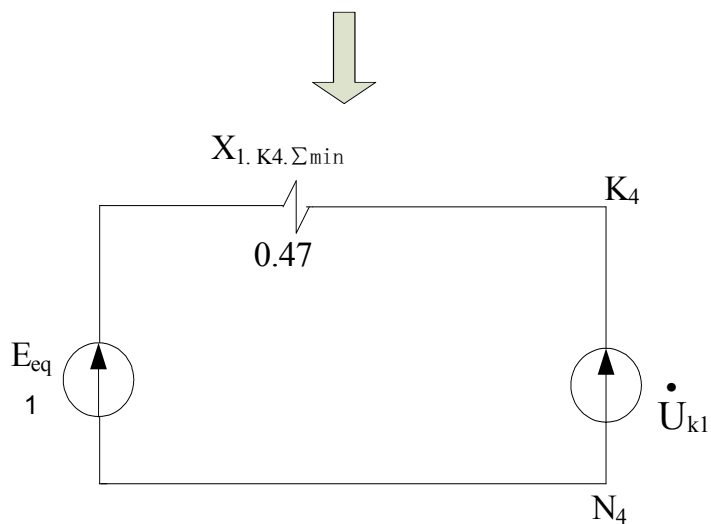


图 A2.33 化简图

$$X_{1.K4.\Sigma\min} = [(X_{1.S1\min} + X_{1.L1}) // (X_{1.S3\min} + X_{1.L3} + X_{1.Tm} + X_{1.Th}) + X_{1.L2}] // X_{1.S2\min}$$

$$= [(0.87 + 0.66) // (14.4 + 1.32 + 0 + 1.17) + 0.60] // 1.25 = 0.77$$

A 2.1.2.7 线路 L3 末端 K5 点故障时各 序阻抗的化简

(1) 零序大方式

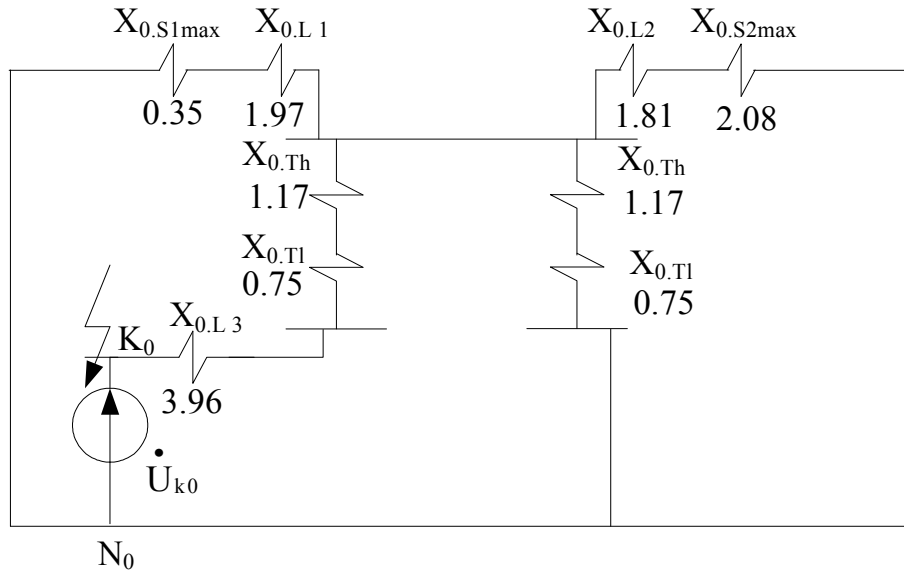


图 A2.34 K5 点零序大方式图

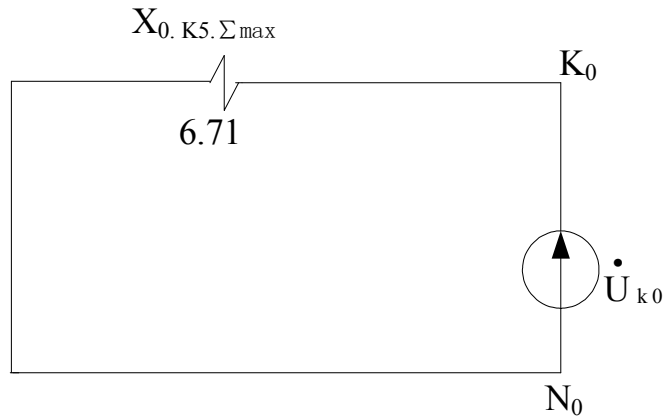
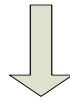


图 A2.35 化简图

$$\begin{aligned} X_{0.K5.\Sigma \max} &= X_{0.L3} + X_{0.Th} + X_{0.TI} + (X_{0.S1\max} + X_{0.L1}) // (X_{0.Th} + X_{0.TI}) // (X_{0.S2\max} + X_{0.L2}) \\ &= 3.96 + 1.17 + 0.75 + (0.35 + 1.97) // (1.17 + 0.75) // (1.81 + 2.08) = 6.71 \end{aligned}$$

对 110kV 母线处的保护，零序电流分支系数为 1。

(2)零序小方式

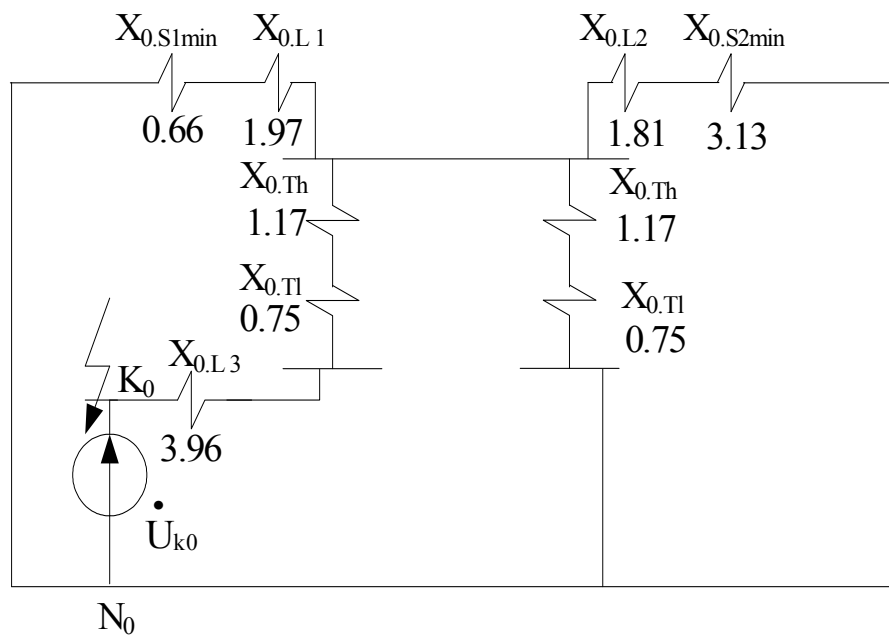


图 A2.36 K5 点零序小方式图

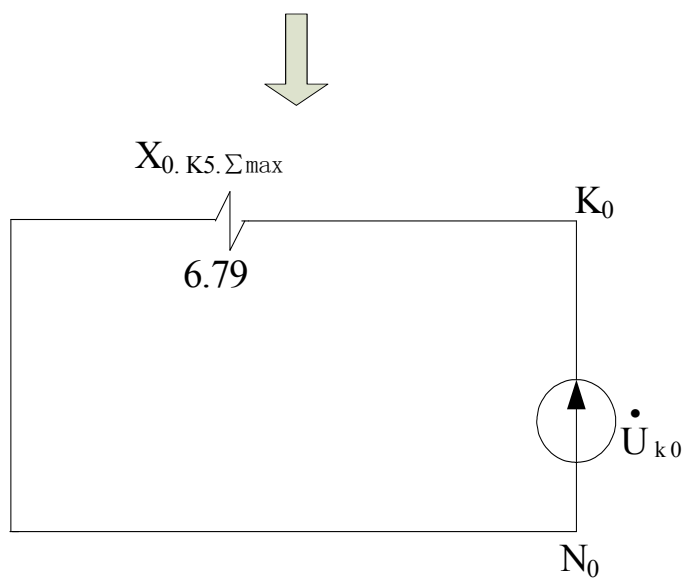


图 A2.3 7 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{0.K5.\Sigma\max} &= X_{0.L3} + X_{0.Th} + X_{0.Tl} + (X_{0.S1min} + X_{0.L1}) // (X_{0.Th} + X_{0.Tl}) // (X_{0.S2min} + X_{0.L2}) \\
 &= 3.96 + 1.17 + 0.75 + (0.66 + 1.97) // (1.17 + 0.75) // (3.13 + 1.81) = 6.79
 \end{aligned}$$

对 110kV 母线处的保护，零序电流分支系数为 1。

(3)正序大方式

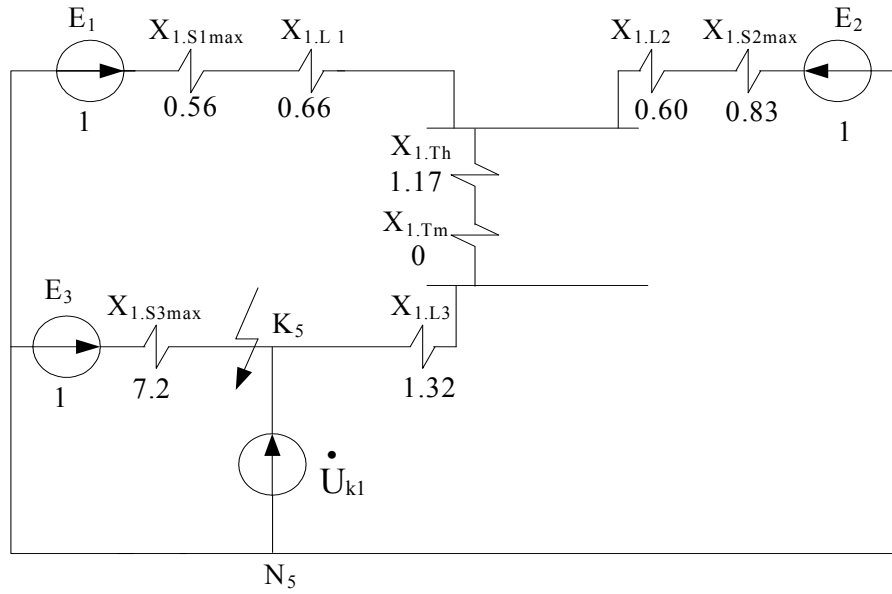


图 A2.38 K5 点正序大方式图

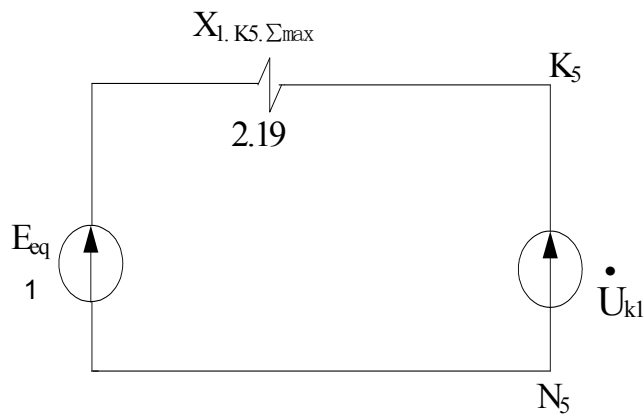
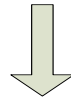


图 A2.39 化简图

$$X_{1.K5.\Sigma \max} = [(X_{1.S1\max} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\max} + X_{1.L2}) + X_{1.Tm} + X_{1.Th} + X_{1.L3}] // X_{1.S3\max}$$

$$= [(0.56 + 0.66) // (0.83 + 0.60) + 0 + 1.17 + 1.32] // 7.2 = 2.19$$

(4)正序小方式

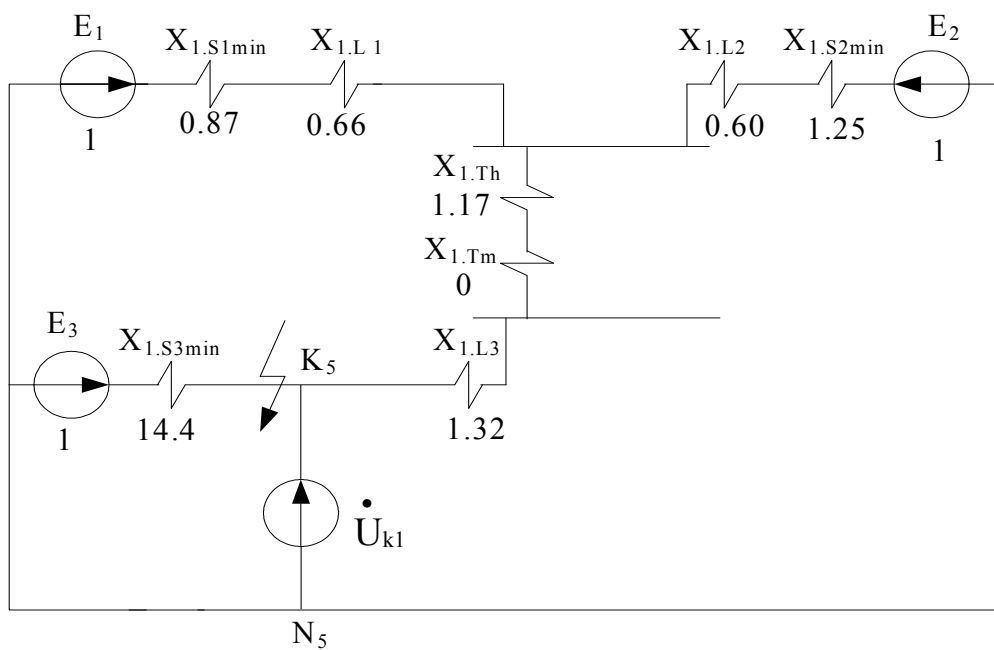


图 A 2.40 K5 点正序小方式图

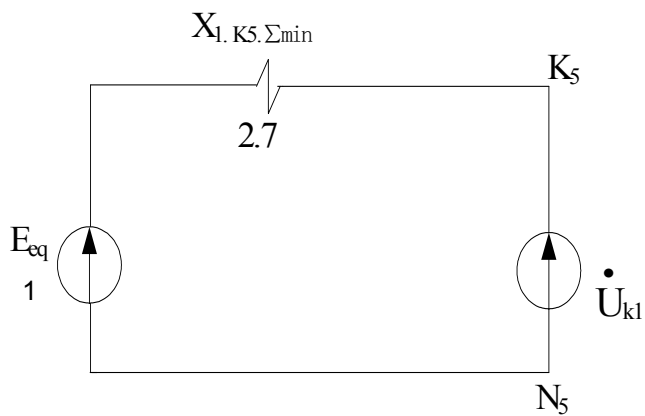
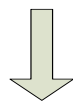


图 A2.41 化简图

$$\begin{aligned}
 X_{1.K5.\Sigma\min} &= [(X_{1.S1\min} + X_{1.L1}) // (X_{1.S2\min} + X_{1.L2}) + X_{1.Tm} + X_{1.Th} + X_{1.L3}] // X_{1.S3\min} \\
 &= [(0.87 + 0.66) // (1.25 + 0.60) + 0 + 1.17 + 1.32] // 14.4 = 2.7
 \end{aligned}$$

表 A2.3 各短路点的各序阻抗标么值

序别	系统运行方式	短路点	电抗编号	标么值
正序	最大运行方式	K1	$X_{1,K1,\Sigma\max}$	$X_{1,K1,\Sigma\max}=0.62$
		K2	$X_{1,K2,\Sigma\max}$	$X_{1,K2,\Sigma\max}=1.51$
		K3	$X_{1,K3,\Sigma\max}$	$X_{1,K3,\Sigma\max}=2.26$
		K4	$X_{1,K4,\Sigma\max}$	$X_{1,K4,\Sigma\max}=0.56$
		K5	$X_{1,K5,\Sigma\max}$	$X_{1,K5,\Sigma\max}=2.19$
	最小运行方式	K1	$X_{1,K1,\Sigma\min}$	$X_{1,K1,\Sigma\min}=0.80$
		K2	$X_{1,K2,\Sigma\min}$	$X_{1,K2,\Sigma\min}=1.78$
		K3	$X_{1,K3,\Sigma\min}$	$X_{1,K3,\Sigma\min}=2.53$
		K4	$X_{1,K4,\Sigma\min}$	$X_{1,K4,\Sigma\min}=0.77$
		K5	$X_{1,K5,\Sigma\min}$	$X_{1,K5,\Sigma\min}=2.7$
零序	最大运行方式	K1	$X_{0,K1,\Sigma\max}$	$X_{0,K1,\Sigma\max}=0.54$
		K2	$X_{0,K2,\Sigma\max}$	$X_{0,K2,\Sigma\max}=0.53$
		K4	$X_{0,K4,\Sigma\max}$	$X_{0,K4,\Sigma\max}=2.49$
		K5	$X_{0,K5,\Sigma\max}$	$X_{0,K5,\Sigma\max}=6.71$
	最小运行方式	K1	$X_{0,K1,\Sigma\min}$	$X_{0,K1,\Sigma\min}=0.61$
		K2	$X_{0,K2,\Sigma\min}$	$X_{0,K2,\Sigma\min}=0.58$
		K4	$X_{0,K4,\Sigma\min}$	$X_{0,K4,\Sigma\min}=2.51$
		K5	$X_{0,K5,\Sigma\min}$	$X_{0,K5,\Sigma\min}=6.79$

A2.2 短路电流计算

A 2.2.1 计算公式

(1)基准电流计算

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \quad (A2.1)$$

式中 S_B ——基准容量；
 I_B ——基准电流；
 U_B ——基准电压。

(2)三相短路电流计算（标么值）

$$I_K^{(3)*} = \frac{E_{eq}}{X_{1.\Sigma}} \quad (A2.2)$$

式中 E_{eq} ——等效电源标么值；
 $X_{1.\Sigma}$ ——正序等效阻抗标么值；
 $I_K^{(3)*}$ ——三相短路电流标么值。

(3)两相短路电流计算（标么值）

$$I_K^{(2)*} = \frac{\sqrt{3}E_{eq}}{X_{1.\Sigma} + X_{2.\Sigma}} \quad (A2.3)$$

式中 $I_K^{(2)*}$ ——两相短路电流标么值；
 $X_{2.\Sigma}$ ——负序等效阻抗标么值。

(4)单相接地短路电流计算（标么值）

$$I_K^{(1)*} = \frac{3E_{eq}}{X_{1.\Sigma} + X_{2.\Sigma} + X_{0.\Sigma}} \quad (A2.4)$$

式中 $I_K^{(1)*}$ ——单相短路电流标么值；
 $X_{0.\Sigma}$ ——零序等效阻抗标么值。

(5) 两相接地短路电流计算（标么值）

$$I_K^{(1.1)*} = \frac{3E_{eq}}{2X_{0.\Sigma} + X_{1.\Sigma}} \quad (A2.5)$$

式中 $I_K^{(1.1)*}$ ——两相接地短路电流标么值。

A 2.2.1 计算结果

表 A2.4 短路电流计算表

故障点	系统运行方式	短路类型	短路电流/A
K ₁	最大运行方式	三相短路	4048
		两相短路	3506
		两相接地短路	4429
		单相接地短路	4230
	最小运行方式	三相短路	3727
		两相短路	2717
		两相接地短路	3728
		单相接地短路	3507
K ₂	最大运行方式	三相短路	3476
		两相短路	3010
		两相接地短路	6127
		单相接地短路	4435
	最小运行方式	三相短路	2949
		两相短路	2553
		两相接地短路	5356
		单相接地短路	3803
K ₃	最大运行方式	三相短路	7299
		两相短路	6321
	最小运行方式	三相短路	6520
		两相短路	5647
K ₄	最大运行方式	单相接地短路	2016
		两相接地短路	1359
	最小运行方式	单相接地短路	1859
		两相接地短路	1301
K ₅	最大运行方式	单相接地短路	1420
		两相接地短路	1009
	最小运行方式	单相接地短路	1292
		两相接地短路	967

