

# 计及电气化铁路两相交流供电系统不对称性的 输电网实用故障计算方法比较研究

刘淼, 石东源, 杨雄平

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 随着我国电网的发展和铁路建设的需要, 电气化铁路采用了两相交流供电系统直接并入电力输电网的牵引模式。数量众多的这种不对称结构供电系统的接入, 给采用对称分量法作为故障分析方法的现有输电网故障计算及继电保护整定计算软件带来了新的问题。本文根据两相交流供电系统的结构特点, 提出了基于相量模型以及等效三相模型的实用故障计算方法, 并将其与现有计算方法进行比较研究。算例验证了三种算法的有效性和实用性, 现有输电网故障计算程序添加部分模块即可利用本文所述的故障计算方法实现功能扩展。利用本文所述基于等效三相模型的计算方法实现的程序包已应用于实际工程。

**关键词:** 电气化铁路; 两相交流供电; 故障计算

## Comparison of fault calculation methods for transmission network considering unsymmetrical two-phase railway power supply system

LIU Miao, SHI Dong-yuan, YANG Xiong-ping

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Along with the development of railway and power grid, a new traction mode, so called two-phase AC traction power supply mode, is adopted in China. The three-phase unbalance caused by traction system make it difficult to apply symmetrical component method, which is widely used in transmission network, in fault calculation. In this paper, based on the study on the structure of two-phase power supply system, three fault calculation methods for transmission network considering two-phase railway power supply system are introduced. The comparison of three methods is also presented. The test result of an actual transmission network using proposed three methods shows the efficiency and practicability of all the methods. The calculation programs applying in transmission network nowadays can be extended by adding special module using one of the three methods to calculate the fault current when faults occur in two-phase railroad power supply system. A software package based on these methods has been already applied in relative department.

**Key words:** electrified railroad; two-phase AC traction power supply; fault calculation

中图分类号: TM713; TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)08-0021-06

## 0 引言

电力牵引以其特有的优势成为了铁路的重要牵引动力, 我国《中长期铁路规划》将电气化铁路里程数作为今后铁路建设的主要指标。两相式供电系统作为电气化铁路供电系统的一种, 以其供电可靠、适合牵引重载和快速列车的特点, 近年来得到了推广应用。已经建成的哈大铁路、浙赣铁路以及正在建设的武广客运专线都采用了这种供电方式。图1所示为典型的两相交流供电系统的结构, 采用220 kV作为供电电压等级, 牵引站内设有220 kV/25 kV单相变压器, 变压器高压侧的两条进线取自系统三相中的两相, 不同的牵引变电站给不同的区段供

电, 各区段之间设有分区亭。为了避免不对称负荷对系统侧负序的影响, 各牵引站接入系统采用换相连接, 即三个牵引变电站为一个单元, 接入系统时相序选择AB-BC-CA构成一个循环。

电气化铁路两相式供电系统属于三相参数不对称结构中的一种极端形式。这种特殊接线形式的大量接入使得区域内220 kV高压输电网发生了显著的三相不对称。由于参数的不对称性, 元件在序分量坐标下不能解耦, 给采用对称分量法作为故障分析方法的现有输电网故障计算及继电保护整定计算软件带来了新的问题。对于求解不对称网络故障, 采用相分量模型进行处理是准确的, 但是其复杂的模型描述和较大的计算量是影响其应用的主要因

素。文献[1]提出多态相分量法,解决了传统相分量法计算效率低下的问题。文献[2]采用相序变换技术和补偿法,提出了基于分解协调法的大规模电网不对称故障计算方法。上述的几种算法虽然都可以解决一般不对称网络的故障计算问题,但是它们本身都不是针对电铁供电系统的特点得来。实际上在220 kV 输电网内电铁输电线路属于辐射形终端线路,因此可以借鉴文献[3~8]中配电网故障计算方法。东北电网有关部门在哈大电气化铁路投入运行后,对两相供电系统故障计算进行了相关探索,取得了一些成果<sup>[9~11]</sup>。文献[9]将两相供电系统内部故障看成是发生在系统侧牵引节点(即PCC点)的带过渡电阻的不对称故障,用对称分量法进行分析。文献[11]则通过动模试验的方法提出另一种两相输电线路的故障计算模型,然而这一模型还缺乏足够的理论分析。现在不同区域电网在两相供电系统故障计算模型的选择上依然存在着分歧。

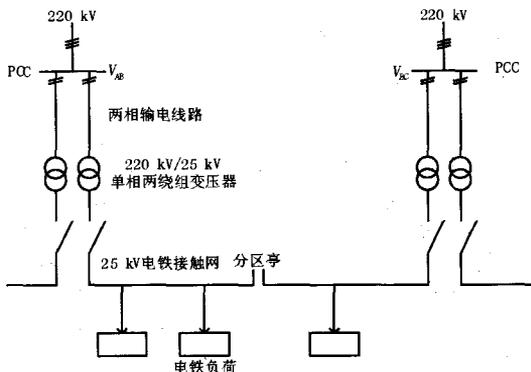


图1 两相交流供电系统结构

Fig.1 Structure of two-phase AC power supply system

鉴于两相式供电系统的建模方法、接入输电网后全网的故障计算方法以及程序实现方法仍然困扰着电网的相关工作人员,因此有必要对这种复杂输电网络故障计算方法进行综合比较研究。本文针对两相式供电系统的特点,提出基于相分量模型的故障计算方法以及基于等效三相模型的故障计算方法,并将其与文献[9]中提出的故障计算方法进行了比较。通过算例验证了三种方法的正确性,并比较了各种算法的特点以及实用性。

### 1 基于相分量模型的故障计算方法

相分量模型如图2所示,由以下几部分构成:作为牵引站电源的三相对称系统侧;由牵引变电站两相进线及牵引变压器组成的牵引侧;牵引站两相进线从三相系统引出时的母线节点,即牵引节点(PCC点)。系统侧在牵引节点作戴维南等值,其

中 $E_p(p=a, b, c)$ 是其等值三相电势, $Z_G$ 为其等值阻抗;牵引侧采用实测或计算得来的相参数, $Z_s$ 、 $Z_m$ 分别为两相线路自阻抗和互阻抗, $Z_T$ 为单相变压器漏抗。牵引侧单相变压器空载,牵引侧无电源。分析可知,当三相对称系统内部故障时,牵引侧既无电源,又无故障电流通路(忽略牵引变压器激磁电抗),因此牵引侧接入对输电网无影响,此时的故障计算方法采用对称分量法。下文分析当牵引侧故障时输电网故障电流的计算方法。

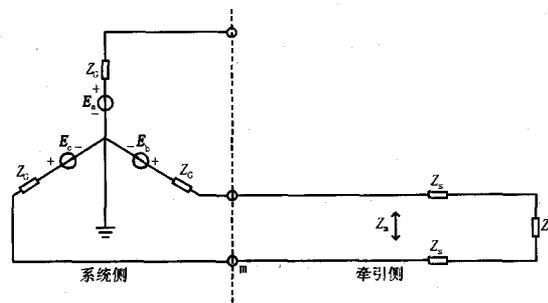


图2 相分量模型示意图

Fig.2 Diagram of phasor model

#### 1.1 牵引侧故障类型

根据电牵引侧故障点的位置,可将故障分为两类,一是发生于牵引变压器两相进线上,二是发生于牵引变压器低压侧。对于第一类故障,可能发生三种故障即单相短路、两相短路和两相短路接地。对于第二类故障,由于牵引变低压侧有一端接地,从高压侧看来只有一种故障形式,即串联变压器漏抗两相短路。

#### 1.2 两相交流供电系统故障计算

故障计算的关键在求解故障时牵引变压器两相进线上的电流。下文给出不同故障点、不同故障类型下的两相进线电流表达式,以及全网电流的求解方法。

##### 1) 牵引线路末端故障

##### a. B相接地短路

$$I_b = \frac{E_b}{Z_G + Z_s} \quad (1)$$

$$I_c = 0 \quad (2)$$

##### b. BC两相接地短路

$$\begin{bmatrix} I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{(Z_G + Z_s)^2 - Z_m^2} \begin{bmatrix} Z_G + Z_s & -Z_m \\ -Z_m & Z_G + Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

##### c. BC两相短路

$$I_b = \frac{E_b - E_c}{2(Z_G + Z_s - Z_m)} = -I_c \quad (4)$$

##### 2) 牵引变压器低压侧故障

$$I_b = \frac{E_b - E_c}{2(Z_G + Z_s - Z_m) + Z_T} = -I_c \quad (5)$$

3) 系统侧电流求解

根据式(1)-(5)求出两相进线上各相故障电流后, 通过相序变换将相电流转化为序电流。计算得来的序电流作为在牵引节点  $m$  的注入电流, 根据电路理论, 系统内任意节点  $q$  三序电压  $U_{q(r)}$  ( $r=1,2,0$ ) 为

a. 正序网

$$U_{q(1)} = U_{q(1)}^{(0)} + Z_{qm(1)} I_{m(1)} \quad (q=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

b. 负序、零序网

$$U_{q(r)} = Z_{qm(r)} I_{m(r)} \quad (q=1, 2, \dots, n; r=0, 2) \quad (7)$$

在上述两式中,  $q \neq m$  时,  $Z_{qm(r)}$  ( $r=0, 1, 2$ ) 为系统内节点  $q$  和牵引节点  $m$  的各序互阻抗, 当  $q = m$  时, 即为  $m$  节点的自阻抗。  $U_{q(1)}^{(0)}$   $U_{q(r)}^{(0)}$  在实际计算中取值为标么值 1.0。求得各节点的各序电压后, 就能够求解各支路电流。

2 基于对称分量模型的故障计算方法

如图 3 所示为文献[9]采用的对称分量模型, 该模型将发生于电铁两相供电系统内的故障看成是发生在牵引节点的带过渡电阻的不对称故障。图 4 所示为牵引线路末端两相接地和两相短路时的复合序网,  $Z_{(120)}$  为从 PCC 点看入系统的各序阻抗。下文给出应用对称分量法得到的故障口电流表达式, 其中  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $Z_{TL}$  为单相变压器漏抗,  $I_{a1}$  为 a 相正序电流。

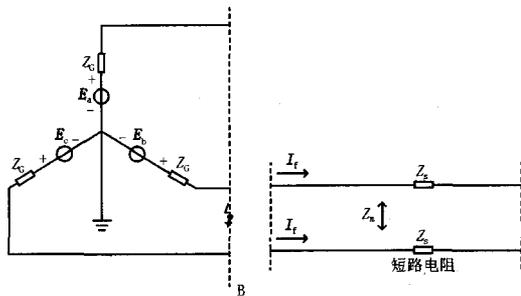


图 3 对称分量模型示意图

Fig.3 Diagram of symmetrical component model

1) 牵引线路末端故障

a. B 相接地短路

$$I_b = \frac{3V^{(0)}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_s} \quad (8)$$

b. BC 两相接地短路

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z_1 + Z_s - Z_m + (Z_2 + Z_s - Z_m) // (Z_0 + Z_s + 2Z_m)} \quad (9)$$

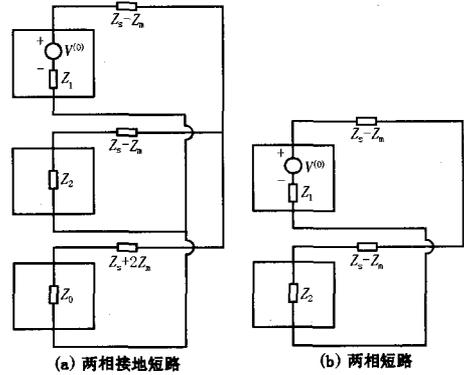


图 4 复合序网

Fig.4 Composite sequence network

$$I_b = \left( a^2 - \frac{Z_2 + Z_s - Z_m + a(Z_0 + Z_s + 2Z_m)}{Z_2 + Z_s - Z_m + Z_0 + Z_s + 2Z_m} \right) I_{a1} \quad (10)$$

$$I_c = \left( a - \frac{Z_2 + Z_s - Z_m + a^2(Z_0 + Z_s + 2Z_m)}{Z_2 + Z_s - Z_m + Z_0 + Z_s + 2Z_m} \right) I_{a1} \quad (11)$$

c. BC 两相短路

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z_1 + Z_s - Z_m + Z_2 + Z_s - Z_m} \quad (12)$$

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} = -I_c \quad (13)$$

2) 牵引变低压侧故障

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z_1 + Z_s - Z_m + Z_2 + Z_s - Z_m + Z_{TL}} \quad (14)$$

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} = -I_c \quad (15)$$

3) 系统侧电流求解

系统侧各支路电流分布可以用式(6)-(7)求解。

3 基于等效三相模型的故障计算方法

等效三相模型即在两相供电系统内增加一相虚拟线路, 将两相系统看成是三相对称系统。如图 5 所示, 等效三相线路的序参数采用  $Z_{L1} = Z_{L2} = Z_s - Z_m$ ,  $Z_{L0} = Z_s + 2Z_m$ 。图 6 所示为在 C 节点发生两相接地以及两相短路时的复合序网, 其中  $Z'_{(120)}$  为从 C 节点看入的系统序阻抗。下文给出故障口电流表达式。

1) 牵引线路末端故障

此时即 C 节点发生故障。

a. B 相接地短路

$$I_b = \frac{3V^{(0)}}{Z'_1 + Z'_2 + Z'_0} \quad (16)$$

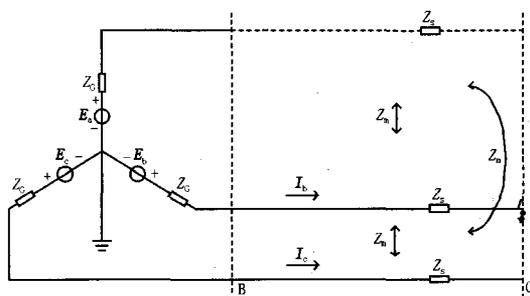


图 5 等效三相模型示意图

Fig.5 Diagram of equivalent three-phase model

b. BC 两相接地短路

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z'_1 + Z'_2 // Z'_0} \quad (17)$$

$$I_b = \left( a^2 - \frac{Z'_2 + aZ'_0}{Z'_2 + Z'_0} \right) I_{a1} \quad (18)$$

$$I_c = \left( a - \frac{Z'_2 + a^2Z'_0}{Z'_2 + Z'_0} \right) I_{a1} \quad (19)$$

c. BC 两相短路

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z'_1 + Z'_2} \quad (20)$$

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} = -I_c \quad (21)$$

2) 牵引变低压侧故障

$$I_{a1} = \frac{V^{(0)}}{Z'_1 + Z'_2 + Z_{TL}} \quad (22)$$

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} = -I_c \quad (23)$$

3) 系统侧电流求解

系统侧各支路电流分布用式(6)~(7)求解。

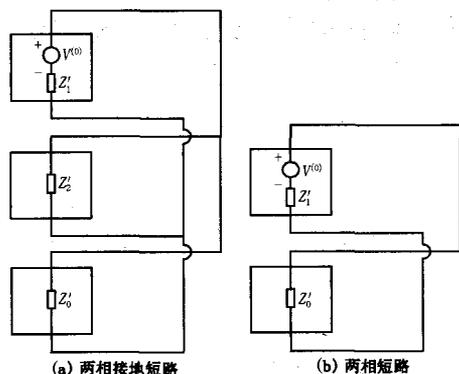


图 6 复合序网

Fig.6 Composite sequence network

4 三种故障计算方法之间的关系

上文的三种故障计算方法的不同之处在故障发生在两相供电系统内时求解 PCC 节点向三相对称系统侧注入电流的方法。其中基于相分量模型的方法直接利用欧姆定律，后两种方法利用对称分量法。

根据戴维南定理， $Z_{(120)}$  和  $Z'_{(120)}$  分别为 B 节点的自阻抗  $Z_{BB(120)}$  和 C 节点的自阻抗  $Z_{CC(120)}$ 。比较图 3 和图 5，图 5 可以认为是在系统的 PCC 节点(B 节点)追加一条树枝 BC， $Z_{L(120)}$  为 BC 支路的三序阻抗。有如下关系：

$$Z_{CC(120)} = Z_{BB(120)} + Z_{L(120)} \quad (24)$$

即：

$$Z'_{(120)} = Z_{(120)} + Z_{L(120)} \quad (25)$$

可知，复合序网图 4 与图 6 参数完全相同，故障电流表达式(8~15)与式(16~23)亦完全相同。

进一步比较式(3)和式(10)，将式(9)代入到式(10)中，令  $V^{(0)} = 1.0 \angle 0^\circ$  并注意到  $Z_1 = Z_2 = Z_0 = Z_G$  化简得到：

$$I_b = \frac{a^2(Z_G + Z_s + Z_m) + Z_m}{(Z_G + Z_s)^2 - Z_m^2} \quad (26)$$

由于式(9)是以 A 相作为特殊相得来，因此在相量模型中，可以令  $E_A = 1.0 \angle 0^\circ$ ，式(3)中  $I_b$  可写为：

$$I_b = \frac{a^2(Z_G + Z_s) - aZ_m}{(Z_G + Z_s)^2 - Z_m^2} \quad (27)$$

可知式(26)与(27)完全相同，同理可证故障电流表达式(1~5)与式(8~15)是等价的。

综合以上关系式可知，虽然本文所述的三种计算方法采用了不同的故障计算模型和不同的解法，但是其计算结果是一致的，这进一步从理论上证明了这三种计算模型的正确性。需要注意的是，对于发生在两相输电线路上的非首末端故障，在使用以上计算公式时，应将式中线路自阻抗和互阻抗用两相输电线路故障点前的自阻抗和互阻抗替代。

这三种方法都可以作为电气化铁路两相系统故障时输电网的故障计算算法。从计算效率来看，由于计算基于阻抗矩阵，因而三种方法均有良好的计算效率。对于现有的输电网故障计算程序，需要增加特殊处理模块来实现两相供电系统的故障计算功能。采用前两种计算方法时需针对两相供电系统开发故障计算模块，其代码量较多；基于等效三相模型的方法由于将两相系统看成三相来处理，其故障处理方法与原有三相系统并无差别，因此无需增加针对两相系统的故障处理代码，只需添加将两相

线路参数转换为等效三相线路参数的代码即可。

### 5 算例

本文算例以某实际输电网为对象, 分别采用本文所述的三种计算方法对其中的 220 kV 两相供电系统故障进行了分析。研究系统中包含 220 kV 牵引站 11 座, 其进线采用同杆并架双回线接入, 每回进线均为两相线路, 图 7 所示为其局部结构。算例使用计算程序是在原有输电网故障计算程序基础上, 分别根据本文所述三种计算方法增加针对电铁两相线路和牵引变压器的特殊处理模块编制而成。表 1 所示为 BC 两相接地故障发生在两相供电系统不同位置时, 分别采用三种计算方法求得的牵引线路及其相邻线路的 B 相故障电流。由表 1 可见, 忽略由

计算带来的舍入误差, 本文所述三种方法所计算得到的故障电流是相等的, 这与本文进行的理论分析一致。

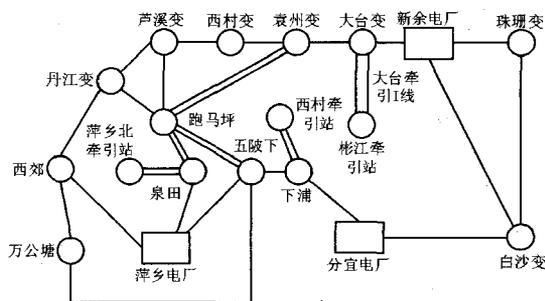


图 7 某输电网局部结构

Fig.7 Structure of transmission network

表 1 两相接地故障三种方法计算所得故障电流

Tab.1 Two-phase ground fault current calculated using three methods

线路名称	故障位置	故障电流 (标么值)		
		相量模型	对称分量模型	等效三相模型
大台牵引 1 线	牵引线末端	28.404 8	28.404 8	28.404 9
	牵引线中点 (50%)	37.729 5	37.729 8	37.729 8
	牵引变低压侧	4.785 9	4.785 9	4.785 9
大袁线	牵引线末端	9.892 7	9.892 8	9.892 8
	牵引线中点 (50%)	13.118 2	13.118 2	13.118 3
	牵引变低压侧	1.736 9	1.736 9	1.736 9
新大线	牵引线末端	14.541 2	14.541 2	14.541 3
	牵引线中点 (50%)	19.268 2	19.268 4	19.268 4
	牵引变低压侧	2.567 3	2.567 3	2.567 3

### 6 结语

电气化铁路两相式供电系统的大量接入造成了输电网的参数不对称, 现有输电网故障计算软件采用的算法已经不再适用。本文详细地分析了三种计及两相式供电系统不对称性的实用故障计算方法, 并比较了三种计算方法之间的异同以及程序实现的难易程度。通过算例验证了本文的分析结论。其中基于等效三相模型的故障计算方法具有最少的代码量, 应用该模型开发的程序包已经成功应用于江西电网, 解决了实际问题。

### 参考文献

[1] 姜彤, 郭志忠, 陈学允, 等. 多态分量法及其在电力系统三相不对称分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 70-74.  
JIANG Tong, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun, et al. Polymorphic Phase Components Method and Its Application in Three-phase Unbalance Calculation of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5):

70-74.  
[2] 曹国臣, 武晓梅. 一种基于分解协调法的电力系统故障计算方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 14-19.  
CAO Guo-chen, WU Xiao-mei. A New Method for Fault Calculation in Power System Based on the Decomposition-coordination Method[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 14-19.  
[3] 傅旭, 王锡凡. 三相参数不对称的环状复杂配电网故障计算的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 64-68.  
FU Xu, WANG Xi-fan. A New Approach for Fault Calculation in Asymmetrical Three-phase and Weakly Meshed Distribution Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 64-68.  
[4] 曹国臣, 傅旭. 辐射状配电网故障分析计算的解耦相分量法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 15-20.  
CAO Guo-chen, FU Xu. A Decoupling Phase Domain Method to Calculate Faults in a Radial Distribution Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 15-20.  
[5] 车任飞, 李仁俊, 李玉忠. 基于叠加原理的配电网短

- 路故障计算[J]. 电力系统自动化, 2001,25(24): 22-24.  
CHE Ren-fei, LI Ren-jun, LI Yu-zhong. Short Circuit Calculation of Distribution Network Based on Superposition Theorem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(24): 22-24.
- [6] 张红. 一种辐射型配电网短路电流实用算法[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 38-41.  
ZHANG Hong. A Practical Algorithm of Short Current Calculation for Radial Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 38-41
- [7] 曹国臣, 张弓, 宋家骅, 等. 配电网故障计算的通用方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 41-48.  
CAO Guo-chen, ZHANG Gong, SONG Jia-hua, et al. Canonical Method for Calculating Fault in Distribution Network[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 41-48.
- [8] 王艳松, 王平. 配电网短路故障的新算法[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 8-14.  
WANG Yan-song, WANG Ping. New Algorithm for Calculating Distribution System Short-circuit Fault[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 8-14.
- [9] 郑天一, 王建勋. 220 kV 两相供电线路短路电流与继电保护定值计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 97-99.  
ZHENG Tai-yi, WANG Jian-xun. Short Current and Relay Protection Setting Calculation for 220 kV Two-phase Power Supply Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 97-99.
- [10] 钱海. 哈大电铁 220 kV 线路继电保护运行相关问题探讨[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(12): 68-71.  
QIAN Hai. Discussion of 220 kV Line-protection Operation in Ha-Da Electrified Railway Road[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(12): 68-71.
- [11] 李保福, 邱金辉, 张丽英. 电铁工程两相式供电系统继电保护动态试验模型的研究[J]. 东北电力技术, 2001,(4): 20-23.  
LI Bao-fu, QIU Jin-hui, ZHANG Li-ying. Research on Realy - Protection Dynamic - test model for 220kV Two-phase Power Supply System of Electrified Railway Road[J]. Northeast Electric Power Technology, 2001,(4): 20-23.
- [12] 安德逊 P.M. 电力系统故障分析[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.  
Anderson P.M. Power System Fault Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Industry Press, 1980.
- 
- 收稿日期: 2006-11-07; 修回日期: 2006-12-21
- 作者简介:  
刘 焱 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障计算整定计算理论及相关软件技术; e-mail: liumiao\_007@163.com  
石东源 (1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统二次系统自动化、电力系统软件技术等;  
杨雄平 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护整定计算理论及相关软件技术。
- 
- (上接第 15 页 continued from page 15)
- TAO Ran, XIONG Wei-qun. Relay Protection, Automatic Device and Second Order Loop[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1981.
- [5] 华中工学院. 电力系统继电保护原理与运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.  
Huazhong Engineering College. Theory and Function of Electrical Power System Protective Relay[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1981.
- [6] 国家电力调度通讯中心. 电力系统继电保护实用技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.  
National Electric Power Regulation and Communication Center, Questions and Answers of Applicable Technology on Electric Power System Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [7] 南京电力学校. 电力系统继电保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.  
Nanjing Electric Power School. Electrical Power System Protective Relay[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.
- [8] 重庆电力学校. 电力系统继电保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.  
Chongqing Electric Power School. Electrical Power System Protective Relay[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992.
- [9] 天津大学. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.  
Tianjing University. Theory of Electrical Power System Relay Protective[M]. Beijing: China Electric Power Industry Press, 1980.
- [10] 王广延. 电力系统元件保护原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.  
WANG Guang-yan. Theory of Power Electric System Component Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.
- [11] 许建安. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2004.  
XU Jian-an. Electrical Power System Relay Protective[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.
- 
- 收稿日期: 2006-12-07; 修回日期: 2007-03-19
- 作者简介:  
万 利 (1949-), 男, 副教授, 研究方向为继电保护、计算机仿真. E-mail: wanguan789@yahoo.com.cn