

# 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨

田华<sup>1</sup>, 王卿<sup>2</sup>, 朱峰<sup>3</sup>, 杜林<sup>4</sup>, 毛玉宾<sup>4</sup>

(1. 河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 河南省电力行业协会, 河南 郑州 450000;  
3. 郑州供电公司, 河南 郑州 450007; 4. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450006)

**摘要:** PSASP是目前国内较为普遍的短路电流计算程序, 针对程序中不同计算方法、不同初值条件下短路电流计算结果存在较大差异的情况, 结合国内现行的短路电流计算标准, 分析研究了基于潮流和基于网络条件下三相短路电流计算结果存在差异的原因。研究结论可为制定统一规范的互联电网短路电流计算条件提供依据。

**关键词:** PSASP; 短路电流计算; 计算方法; 初值条件

## Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software

TIAN Hua<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>2</sup>, ZHU Feng<sup>3</sup>, DU Lin<sup>4</sup>, MAO Yu-bin<sup>4</sup>

(1. Electric Power of Henan, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Electric Power Association, Zhengzhou 450000, China;  
3. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450007, China; 4. Henan Electric Power Survey & Design Institute,  
Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** PSASP short-circuit current calculation software is widely used in China, however, there exists a prevalently acknowledged phenomenon that with the same source data its calculation result differs under different calculation conditions or with different methods. With consideration of current calculation standards for short-circuit current, the reasons for the symmetrical short-circuit calculation result difference between flow-based and network-based calculation are analyzed. The conclusions drawn from the analysis are valuable for standardizing short-circuit current calculation for interconnected grids.

**Key words:** PSASP; short-circuit current; calculation method; initial condition

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0056-05

## 0 引言

三相短路电流计算是电力系统规划、设计、运行中必须进行的计算分析工作。目前, 三相短路电流超标问题已成为困扰电网运行的关键问题。在当前短路电流问题突出的情况下, 很多省级电网多个站点需要将原有开断能力为50 kA的短路电流开关设备更换为63 kA的开关设备, 同时配合网络调整措施, 以期将500 kV电网短路电流限制在63 kA以下<sup>[1-3]</sup>。

然而, 在进行三相短路电流计算时, 各设计、运行和研究部门采用的计算程序、计算方法以及建网方式各不相同, 这就有可能造成短路电流计算结论的差异和短路电流超标判断的差异, 以及短路电流限制措施的不同。如果短路电流计算结果偏于保守, 有可能造成不必要的投资浪费; 若偏于乐观, 则将给系统的安全稳定运行埋下灾难性的隐患。

文献[4-5]介绍研究了一些实用的短路计算方法

以及短路电流计算程序的设计, 文献[6]中将国内应用较为广泛的电力系统分析程序BPA和PSS/E的短路电流计算结果进行了分析比较, 提出了在应用以上程序计算短路电流时应注意的问题。

电力系统分析综合程序(PSASP)是在我国各省级电力设计院以及调度部门普遍使用的系统分析计算程序, 本文在研究并比较三相短路电流计算标准的基础上, 针对电力系统分析综合程序PSASP6.25版, 比较了不同短路电流计算方法、计算条件以及建网方式对短路电流计算结论的影响, 以期为电网短路电流的计算提供更为合理的方法和思路。

## 1 短路电流计算标准

### 1.1 国际标准

国际电工委员会(IEC)于1998年制定了短路电流计算标准, 在世界范围内被广泛认可。2001年国际电工委员会制定了新的短路电流计算标准

IEC60909, 并很快应用于欧洲、北美等地, 各个国家均以此为基础并结合自己国家的实际情况制定了相应的国家标准。

英国也采纳了该标准, 并在其国家标准 BS7639 中得以体现。但是英国电力行业普遍认为该标准是保守的, 为此需付出很多不必要的投资, 所以, 英国电网在进行一些计算包括短路电流计算时, 采用的是 1990 年根据其“良好的工业实践”制定的 ERG74 (Engineering Recommendation G74) 标准。根据 ERG74 的要求, 短路电流计算是基于潮流的短路电流计算, 且需分别计算母线的单相和三相短路电流水平<sup>[7]</sup>。

### 1.2 国家标准及行业标准

**国家标准:** 我国现有的短路电流计算国家标准由国家技术监督局制定, 在 1996 年 1 月 1 日实施的 GB/T 15544-1995 “三相交流系统短路电流计算”国家标准, 标准等效采用 IEC9090 (1988) 《三相交流系统短路电流计算》, 目前尚未根据新标准修编, 但是基本原则内容和 IEC60909 中的标准一致。

**行业标准:** 原电力工业部在 1995 年 5 月 1 日颁布实施的行业标准 DL/T 559-94 《220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程》中也对短路电流的计算做了相关的规定, 该标准在近期已失效。

### 1.3 各标准相关内容介绍

(1) IEC 推荐的三相短路电流计算方法是等值电压源法, 其计算条件为: ①不考虑非旋转负载的运行数据和发电机励磁方式; ②忽略线路电容和非旋转负载的并联导纳; ③具有分接开关的变压器, 其开关位置均视为在主分接位置; ④不计弧电阻; ⑤不计负荷电流的影响; ⑥ 35 kV 及以上系统的最大短路电流计算时, 等值电压源取标称电压的 1.1 倍, 但不超过设备的最高运行电压。

$I_k'' = CU_N \sqrt{3} Z_k$ , IEC 新标准中规定对于 1 kV 以上的中压和高压系统,  $C_{\max}$  取 1.10,  $C_{\min}$  取 1.000<sup>[8-9]</sup>。

(2) 我国的国家标准由于等效采用 IEC 的相关标准, 所以在计算中推荐采用同样的计算方法和计算条件<sup>[10]</sup>。

(3) 《220~500 kV 电网继电保护装置运行整定规程》, 我国原有电力行业标准中有关短路电流计算的相关规定如下:

①忽略发电机、调相机、变压器、架空线路、电缆线路等阻抗参数的电阻部分, 并假定旋转电机的负序电抗等于正序电抗; ②各级电压可采用标称电压值或平均电压值, 而不考虑变压器电压分接头实际位置的变动; ③不计线路电容和负荷电流的影

响; ④不计故障点的相间电阻接地电阻; ⑤不计短路暂态电流中的非周期分量。

通过以上比较, IEC 标准、我国等效采用 IEC 标准的国家标准和我国的行业标准计算条件的差别主要在于节点电压的选择上, IEC 引进了电压系数的概念, 节点电压相当于取为  $1.1U_N$ ; 电力行业标准中各级电压采用标称电压值或平均电压值, 相当于  $1.05U_N$ 。

## 2 计算程序、算法及计算结果分析比较

### 2.1 现有各短路电流计算程序和计算方法介绍

各区域电网、甚至同一区域电网内部的不同部门 (如规划、运行等不同部门), 在进行短路电流计算时, 都可能采用不同的计算条件, 其差别主要集中在变压器变比、节点电压的选取上。对于变压器变比, 有取 1.0, 也有取实际运行变比的; 对于节点电压, 可能取 1.0, 也可能取 1.05 或 1.1; 此外, 在计算数据中对于线路电容、无功补偿设备以及负荷模型的处理, 也将影响到短路电流的计算结果, 从而导致对于短路电流超标的不同判断结果。

目前, 在国内电力行业普遍应用的 BPA、PSASP、PSS/E、NETOMAC 等程序的潮流计算功能均已经过验证, 有着一致的计算结果。然而在进行短路电流计算时, 其过程并不都是基于潮流的, 而是基于一些不同的初值设置, 这或为导致计算结论迥异的原因之一。加之各个计算程序往往对于短路计算的初值设置缺乏足够的灵活性, 对于计算过程及其中间产生数据缺乏足够的可观测性, 所以计算人员往往不得不根据不同程序的固有设置来进行短路计算, 得出不同的、甚至差别较大的计算结果也就在所难免。

美国 PTI 公司出品的 PSS/E 软件的短路电流计算模块提供了相对较为灵活的用户自定义空间, 用户可以自定义计算初值, 也可选择基于潮流的和基于网络 (采用经典方法、ANSI 标准或 IEC 标准) 的计算方法。基于网络计算时, 还允许用户任意设定短路电流计算的初值条件。这些可设定的选项包括: ①变比选择: 1.0 或正常变比; ②考虑充电电容与否; ③计及并联补偿与否; ④节点电压值; ⑤发电机功率因素。

BPA 也提供了基于潮流和基于初值条件的短路电流计算功能, 在基于初值条件方式下, 程序将所有节点的电压取为  $U = 1.0$ , 计算过程中不计线路电容和无功补偿装置的影响<sup>[10]</sup>。

电力系统分析综合程序 (Power System Analysis Software Package) 简称 PSASP, 自 1973 年开始开发

至今已由早期的机器指令版升级为如今的微机Windows版。国内大多电力系统调度、规划部门目前一直采用PSASP进行电力系统分析计算。

下面以PSASP6.25版为计算程序，以河南2015年220 kV及以上规划电网为网络基础，分析程序中不同计算方法、不同的计算条件所带来的短路电流计算结果的差别。

### 2.2 基于网络的计算结果比较

PSASP 在短路电流的计算方面提供了两种计算方法，一是基于方案（即为基于网络或基于初值条件）的计算方法，二是基于潮流的计算方法。

目前河南电网的运行和规划设计部门在三相短路电流计算均采用 PSASP 程序中基于网络的计算方式。在该计算方式下，短路计算通常采用和潮流计算完全相同的网络数据，在输入的数据网络中包括电网中的所有设备，其中包含了变电站内的无功补偿装置（低抗、低容）、高压电抗器（母线高抗、线路高抗）、线路电容等。由于潮流计算大多用大负荷时的计算网络，所以变电站内的无功补偿装置均为容性补偿装置即并联补偿电容器组。

除基于潮流的短路电流外，根据相关短路电流计算标准，短路电流计算均不考虑线路充电电容以及线路高抗、低压并联电容器、电抗器等无功补偿设备的影响。

为比较不同计算条件下的短路电流计算结果，通过人为的对原潮流计算的网路数据加以处理，从计算结果中，可以发现一些规律性的变化。

基于网络下各种不同初值条件的短路电流、等值阻抗和等效电压源分析计算结果见表 1、表 2、表 3 所示。

根据计算结果，并联补偿装置和线路电容对短路电流的计算结果影响较大。

考虑并联补偿后，短路电流的变化有升有降，其中，若是容性补偿占主导影响，短路电流增加，反之，则下降；是否考虑线路充电电容，短路电流的变化幅度也较大；若同时考虑充电电容和并联补偿，其影响是两者的叠加，由于线路电容和变电站内电容器等容性补偿装置总加的影响要大于网络内感性补偿装置如高抗的影响，所以在计算网络中去除所有感性、容性补偿装置和线路电容后所得到的短路电流计算结果小于数据调整前的计算结果。

在原有潮流计算网络的基础上，不计并联电抗、并联电容和线路电容后，所研究的电网节点平均短路电流水平较原计及以上因素的计算结果小 4.6 kA。

处于网络枢纽位置，变电站进出线回路数较多，

线路电容充电功率较大的区域，网络数据调整前后的短路电流的计算差别较大。如特高压站的相关节点短路电流的差值均在7 kA左右，位于河南电网的枢纽位置，变电站出线规模为9回，同时变电站容性无功补偿设备配置较大的香山变短路电流的差值在5 kA以上。

表1 基于网络下不同初值条件的短路电流计算结果比较

Tab.1 Comparison of short circuits obtained from different initial values with network based calculation (kA)

		基于方案	不计电抗	不计电抗、电容	不计电抗、电容、线路电容
1000 kV 变电站	南阳	45.1	197.5	114.0	38.0
	豫北	46.6	154.4	105.7	39.9
	南阳 500 kV 侧	62.4	202.7	231.8	55.9
	豫北 500 kV 侧	59.7	627.0	237.5	52.0
500 kV 变电站	香山	63.4	108.6	204.6	58.0
	洛南	61.1	27.5	127.9	57.9
	白河	61.2	162.1	220.3	55.2
	牡丹	57.8	29.5	99.7	55.6
	郑州	61.6	29.0	128.4	58.2
	洛南 220 kV 侧	48.3	22.8	86.0	46.4
	牡丹 220 kV 侧	45.6	27.5	70.5	43.9
香山 220 kV 侧	42.8	55.4	141.7	38.9	

表2 基于网络下不同初值条件的等值阻抗计算结果比较

Tab.2 Comparison of impedances obtained from different initial values with network based calculation (Ω)

		基于方案	不计电抗	不计电抗、电容	不计电抗、电容、线路电容
1000 kV 变电站	南阳	17.69	28.65	73.96	16.62
	豫北	17.56	42.92	89.25	15.87
	南阳 500 kV 侧	5.84	4.44	7.76	5.67
	豫北 500 kV 侧	6.46	2.81	11.71	6.09
500 kV 变电站	香山	5.60	4.94	6.51	5.47
	洛南	5.57	5.49	5.75	5.49
	白河	5.92	4.80	7.47	5.74
	牡丹	5.80	5.78	5.88	5.72
	郑州	5.54	5.47	5.69	5.45
	洛南 220 kV 侧	3.06	3.05	3.05	3.01
	牡丹 220 kV 侧	3.16	3.20	3.21	3.18
香山 220 kV 侧	3.61	3.52	3.75	3.58	

表3 基于网络不同初值条件的等效电压源计算结果比较

Tab. 3 Comparison of equivalent voltage sources obtained from different initial values with network based calculation (kV)

	基于方案	不计电抗	不计电抗、电容	不计电抗、电容、线路电容
1000 kV 变电站	南阳	1382.4	9797.3	14606.6
	豫北	1417.0	11479.9	16334.2
	南阳 500 kV 侧	630.9	1559.0	3116.9
	豫北 500 kV 侧	668.5	3047.0	4815.8
500 kV 变电站	香山	614.9	930.4	2307.1
	洛南	589.4	262.0	1273.4
	白河	627.5	1347.0	2848.1
	牡丹	580.6	295.0	1015.8
	郑州	591.5	274.8	1265.6
	洛南 220 kV 侧	255.9	120.4	454.6
	牡丹 220 kV 侧	249.5	152.2	391.8
	香山 220 kV 侧	267.9	337.1	920.3

所以根据以上计算结果分析,在基于网络的计算方式中,各个点的短路电流计算结果除了和网络本身的结构有关外,和该点的无功补偿装置,特别是容性无功补偿装置的补偿程度以及线路电容引起的充电功率大小有很密切的关系,网络数据在这一方面的处理可以带来短路电流结果的差异。

各节点的等值阻抗和等效电压源的计算结果也由于不同的建网方式有较大的差距,在某些建网方式下得到的结果基本是无效的。

### 2.3 基于潮流的计算结果比较

PSASP提供了3种负荷类型供选择,①恒阻抗负荷;②感应电动机负荷;③电压静特性模型。电网在电力系统的分析计算中负荷模型一般采用感应电动机负荷模型,其中感应电动机的比例为50%。在基于潮流的短路电流计算方式中,若负荷模型采用感应电动机负荷,在该方式下短路电流计算结果含有这部分感应电动机提供的短路电流;若在程序中,将负荷模型改为100%的恒阻抗模型,则计算中不计入负荷电流的影响。

经比较,以上两种方式下短路电流的平均差值有8 kA左右,所采用的计算网络中由于负荷直接挂在220 kV变电站的高压侧母线,所以220 kV变电站的220 kV母线在数据调整前后短路电流计算差值最大。

此外在基于潮流的计算方式下,发电机有功功率相同的情况下,功率因数越低,负载率越高,电流越大,空载电势越大,故障前短路点的母线电压

也越高,所以短路电流越大。

在一个正常运行的电力系统中,为保证电网的供电可靠性,系统的发电机容量总是冗余的。在计算最大短路电流时,计算条件为所有发电机均开机运行,并尽量多发无功。表4中给出了发电机全开机且尽量多发无功的方式下短路电流计算结果的差异,和理论分析相吻合。

表4 基于潮流方式下各种不同初值条件的短路电流计算结果比较

Tab.4 Comparison of short circuits obtained from different initial values with power flow based calculation

	实际开机 (50%恒阻抗负荷)	实际开机 (100%恒阻抗负荷)	满开机方式 (100%恒阻抗)
1000 kV 变电站	南阳	38.7	36.6
	豫北	42.5	38.1
	南阳 500 kV 侧	61.6	55.3
	豫北 500 kV 侧	58.1	51.2
500 kV 变电站	香山	64.2	57.4
	洛南	66.1	57.5
	白河	62.0	54.8
	牡丹	62.8	55.3
	郑州	67.1	58.0
	牡丹 220 kV 侧	55.4	43.6
	洛南 220 kV 侧	60.8	46.3
	香山 220 kV 侧	47.9	38.2

### 2.4 基于潮流和基于网络的计算结果比较

采用以上两种不同的计算方法,短路电流计算的结果比较见表5所示。采用相同的网络数据(均考虑无功补偿装置和线路充电电容),不计入负荷电流影响的方式下,基于方案的短路电流计算结果普遍大于基于潮流的计算结果。所研究的电网节点在基于方案方式下平均短路电流水平为54.6 kA,在基于潮流的方式下为50.6 kA,基于方案的结果相对基于潮流的结果大4 kA左右。

两种计算方法从单个节点各短路电流计算结果差值来看,特高压站的1000 kV母线和和特高压电网相关的站点以及网络中进出线较多的枢纽节点在两种计算方式下短路电流结果差值较大。根据前述分析,引起上述差异的原因主要和该网络节点的无功补偿装置容量和线路充电电容的大小有关,容性程度越高,计算结果的差异越大。

利用PSASP自带的戴维南等值阻抗计算程序,计算得出戴维南等值阻抗和相应的等效电压源。在以上条件下,基于方案的等值阻抗略大于基于潮流

方式下的等值阻抗，主要原因是基于方案的阻抗计算中，完全未考虑负荷模型的影响，基于潮流的计算中考虑了负荷对阻抗的影响；等效电压源的标么值基本都在  $1.15U_N$  以上，标么值最高达到  $1.42U_N$ ；基于潮流的计算方式得出的等效电压源的标么值基本在  $1.08-1.1U_N$ ，在合适的范围之内。

表5 基于网络和基于潮流下的短路电流计算结果比较

Tab.5 Comparison of short circuits obtained from network based caculation and power flow based caculation with same initial values

		基于网络 (含无功补偿装置 和线路充电电容)			基于潮流 (机组满出力方式)		
		短路 电流	等值 阻抗	电压 源	短路 电流	等值 阻抗	电压 源
1000 kV 变	南阳	45.1	17.69	1382.4	37.3	16.8	1085.9
	豫北	46.6	17.56	1417	39.1	16.21	1097.6
	南阳 500 kV	62.4	5.84	630.9	56.9	5.61	553.0
	豫北 500 kV	59.7	6.46	668.5	51.9	6.14	551.9
500 kV 变	香山	63.4	5.6	614.9	59.6	5.39	556.2
	洛南	61.1	5.57	589.4	58.9	5.31	541.5
	白河	61.2	5.92	627.5	56.4	5.66	552.8
	牡丹	57.8	5.8	580.6	56.7	5.56	546.2
	郑州	61.6	5.54	591.5	59.3	5.29	542.9
	牡丹 220 kV	45.6	3.16	249.5	44.7	3.05	236
洛南 220 kV	48.3	3.06	255.9	47.1	2.86	233.6	
香山 220 kV	42.8	3.61	267.9	39.6	3.47	237.8	

注：在计算中不计负荷电流的影响。

将基于网络方式下去除无功补偿装置和线路电容影响的计算结果和基于潮流方式下（不计负荷的影响且满出力方式）的短路电流结果相比较，所研究节点的平均短路电流值之间的差距只有 0.6 kA，该差距主要是由基于潮流计算方式下潮流计算的电压水平不同造成的，通过调整潮流计算数据，可以得到基本相同的计算结果。

### 3 结论

通过分析国内常用的一些计算程序、计算方法并和PSASP计算程序相比较，可以发现采用PSASP程序所提供的两种短路电流计算方法，若使用同一套数据而不进行数据的二次处理，两种方法计算结果之间的差别较大；同时对于同一种算法，不同的初值条件，也有明显的差别。其差别将影响到电网的开关选择（主要指是否更换开关设备）以及网架的建设方案。

在明晰PSASP程序不同算法、不同网络数据处理方式所带来的结果区别和原因后，就可以结合相关的短路电流计算规定，针对具体的应用，取相应的短路电流设置条件，或对短路电流计算数据和结果进行适当的二次处理，以满足实际应用的需要。

根据以上计算和分析，基于潮流的短路计算结果似更贴近实际值，然而基于潮流的短路计算也有着其局限性。随着电网规模的日益扩大，发生短路时，各发电机出力和系统的节点电压水平是否已调整至合适的水平，是否基于潮流的短路计算是否会造造成计算结果偏低，目前仍有待进一步的研究。

同时，随着目前电网新技术的不断应用和发展速度的加快，电网中新设备、新元件将逐步增多，电网规模加大、互联程度的提高，为电网的分析计算带来一定的难度，分析计算结果也不能令人满意。因此，必须进一步提高电网的计算分析能力，同时在电网公司的统一协调管理下，分区系统内尽量采用统一的计算分析工具、计算数据以及计算规范，以提高计算分析的效率、可比性和正确性。

### 参考文献

- [1] 刘兆林, 殷敏莉. 华东500 kV电网短路电流情况的调查[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 221-224.  
LIU Zhao-lin, YIN Min-li. Analysis of Short-current Failures of the 500 kV Power System in East China Grid[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 221-224.
- [2] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.  
RUAN Qian-tu. Analysis on Short-circuit Current Calculation Standard IEC 6090[J]. Electric Power Construction, 2006, 33(4): 23-26.
- [3] 河南省电力公司. 河南电网“十二五”电网规划设计及远景目标网架展望[Z]. 2008.  
Henan Electrical Power. Design of Power Network Planning for the “11th Five-Year Plan” of Henan and Target Network Construction Research[Z]. 2008.
- [4] 余晓丹, 周树棠, 余国平, 等. 两种实用短路计算方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 108-112.  
YU Xiao-dan, ZHOU Shu-tang, YU Guo-ping, et al. Discussion on Two Practical Methods for Fault Current Calculatio[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(4): 108-112.
- [5] 王皓. 基于网络的继电保护整定计算和短路电流计算程序设计[J]. 现代电力, 2002, 11(6): 59-64.  
WANG Hao. Programming Based on the Network for the Setting of Relays and Shortcircuit Faults Analysis[J]. Modern Electric Power, 2002, 11(6): 59-64.

(下转第 65 页 continued on page 65)

## 参考文献

- [1] 赵惠良, 陶惠良. 微机反时限过励磁保护[J]. 电力自动化设备, 1994, (4): 54-57.  
ZHAO Hui-liang, TAO Hui-liang. Microcomputer Inverse-time over Excitation Protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 1994, (4): 54-57.
- [2] 杨彪, 董建达, 金乃正. 国外 500 kV 变压器过励磁保护的分析[J]. 继电器, 2004, 32 (13): 71-73.  
YANG Biao, DONG Jian-da, JIN Nai-zheng. Analysis of Imported Overexcitation Protection in 500 kV Power Transformer[J]. Relay, 2004, 32 (13): 71-73.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Wei-jian. Theory and Application of Power Main Equipment Protection (2nd ed) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 汤连湘, 王维俭. 变压器微机型过励磁反时限保护判据的研究和改进[J]. 继电器, 1993, 21 (3): 3-5.  
TANG Lian-xiang, WANG Wei-jian. The Research and Improvement of Microcomputer Transformer Overexcitation Inverse-time Protection Criterion[J]. Relay, 1993, 21 (3): 3-5.
- [5] 陈松林, 李海英, 乔勇, 等. RCS-978 变压器成套保护装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (11): 52-56.  
CHEN Song-lin, LI Hai-ying, QIAO Yong, et al. RCS-978 Digital Transformer Protection Set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (11): 52-56.
- [6] 宋斌. 具有不同特性的微机反时限过流继电器的实现[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 57-59.  
SONG Bin. Design of Micro Processor-based Inverse-time Overcurrent Relays with Different Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 57-59.
- [7] 王增平, 高中德, 黄少锋, 等. 微机型发电机-变压器组过励磁保护的研究[J]. 华北电力大学学报, 1996, 23 (4): 20-25.  
WANG Zeng-ping, GAO Zhong-de, HUANG Shao-feng, et al. The research of the Overexcitation Protection Based on Microcomputer for Generator-transformer Units[J]. Journal of North China Electric Power University, 1996, 23 (4): 20-25.
- [8] 贾向恩, 韩力, 罗强. 浅谈大型变压器过励磁保护的可靠性[J]. 宁夏电力, 2004, (3): 19-21.  
JIA Xian-gen, HAN Li, LUO Qiang. The Discussion of Reliability for Transformer's Over Excitation Protection[J]. Ningxia Electric Power, 2004, (3): 19-21.
- [9] 黄莹, 崔静安. 从几次误操作谈变压器过励磁保护原理的改进[J]. 继电器, 2004, 32 (6): 55-59.  
HUANG Ying, CUI Jing-an. Improvement on Transformer Overexcitation Protection by Studying Several Incorrect Operation Accidents of Substation[J]. Relay, 2004, 32 (6): 55-59.
- [6] 张铭, 祝瑞金, 杨增辉, 等. 短路电流计算程序的比较研究[J]. 华东电力, 2006, 33 (4): 20-22.  
ZHANG Ming, ZHU Rui-jin, YANG Zeng-hui, et al. Comparative Study of Short-circuit Current Calculation Softwares[J]. East China Electric Power, 2006, 33 (4): 20-22.
- [7] 吕文杰. 英国国家电网的短路电流控制技术[J]. 华东电力, 2005, 33 (9): 23-25.  
Lü Wen-jie. Short-circuit Current Control for National Grid of the U. K. [J]. East China Electric Power, 2005, 33 (9): 23-25.
- [8] 国际电工委员会. IEC60909 (2001) 《三相交流系统短路电流计算》[Z]. 2001.  
IEC. IEC60909 (2001) Short-Circuit Current Calculation in Three-phase AC Systems[Z]. 2001.
- [9] 谢文, 朱永强, 崔文进. IEC60909 短路电流计算标准分析[J]. 电力建设, 2006, 33 (4): 23-26.  
XIE Wen, ZHU Yong-qiang, CUI Wen-jin. Analysis on Short-circuit Current Calculation Standard IEC 60909[J]. Electric Power Construction, 2006, 33 (4): 23-26.
- [10] 中国国家技术监督局. GB/T 15544 - 1995 三相交流系统短路电流计算[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.  
State Bureau of Quality and Technical Supervision Standards Press of China. GB/T 15544—1995 Short-circuit Current Calculation in Three-phase a.c. Systems[M]. Beijing: Standards Press of China, 1996.

收稿日期: 2009-01-26; 修回日期: 2009-04-07

作者简介:

张侃君(1977-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: Zhangzkj\_7779@sina.com

尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护和安全自动控制;

胡刚(1958-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。

收稿日期: 2009-01-13; 修回日期: 2009-02-27

作者简介:

田华(1972-), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与设计; E-mail: zhuyet@sina.com

王卿(1973-), 女, 工程师, 研究方向为电力可靠性管理与电力行业标准化;

朱峰(1972-), 男, 工程师, 研究方向为城市电网。