

IEC60909 标准与 PSASP 短路计算的比较研究

黄彦浩, 施浩波, 安 宁

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: IEC60909 是国际电工协会 (IEC) 制定的短路计算国际标准, 目的是在通常可以接受的精度下, 建立一个普遍性的、实用并简洁的求取结果的过程。《电力系统分析综合程序》(PSASP) 中的短路计算模块 (SC), 是我国电力系统广泛采用的短路计算程序。对两者的计算内容、计算假定、数学模型和计算方法等方面进行了比较, 阐明了它们的异同, 并结合算例解释了它们计算结果出现差别的原因, 指出了其各自适用的情况。

关键词: IEC60909; 电力系统分析综合程序; 短路计算

Comparison research on the calculation of short-circuit currents of IEC60909 and PSASP short-circuit module

HUANG Yan-hao, SHI Hao-bo, AN Ning

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: IEC60909 is an international standard for the calculation of short-circuit currents prepared by International Electrotechnical Commission (IEC), which aims at establishing a general, practicable and concise procedure leading to results. Short-Circuit module(SC) in Power System Analysis Software Package (PSASP) is one of the most widely used programs for the calculating of short-circuit in China. This paper compares their similarities and differences in calculation content, assumptions, equipment model and arithmetic, then illuminates the reason of the different results by a testing example, and points out their different applied conditions.

Key words: IEC60909; PSASP; calculation of short-circuit currents

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0069-07

0 引言

电力系统短路计算对于系统继电保护和安全自动装置的整定、暂态稳定过程的研究以及规划设计与设备选型均具有重要意义。在短路计算中不同的处理方法可能会导致不完全一致的结果。目前我国电力系统并没有统一的短路计算标准, 常见的计算软件有《电力系统分析综合程序》(PSASP) 和中国版 BPA 电力系统分析程序, 以及部分可采用 IEC 或 ANSI 标准的国外计算程序。本文通过对 IEC 短路计算标准和 PSASP 短路计算程序的主要内容进行对比研究, 分析两者在计算内容、计算假定、元件数学模型、计算算法、计算结果和适用条件等方面的异同, 以期为从事相关工作的技术和科研人员提供必要的参考。

IEC60909 标准^[1~5]是由 IEC 制定的有关电力系统短路计算的国际标准。在此之前, IEC 曾制定过三相交流系统短路电流计算的 IEC909 标准, 我国

于 1996 年颁布了与之等效的《三相交流系统短路电流计算 GB/T 15544-1995》国家标准^[6], 用于进出口设备及对外工程投标。IEC909 在 IEC60909 颁布后被代替。

IEC60909 共包括 5 个部分, IEC60909-0 规定了三相交流系统短路电流计算中元件的数学模型、计算方法等内容, IEC60909-3 规定了同时双分流单相对地短路电流和部分短路路径流地电流的有关内容, 其余 3 个部分为补充说明。

PSASP 是由中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所 (原综合程序室) 开发的, 具有完全自主知识产权的电力系统大型计算机软件包, 自上世纪 70 年代开始研发、推广, 是我国电力系统目前应用最广泛的计算机软件之一。

PSASP 中的短路计算程序 (SC) 以严密的数学理论为基础, 不仅可以计算三相交流系统各种简单和复杂故障下的短路电流, 也可以为暂态稳定计算^[7]提供支持。

本文的讨论以 IEC60909-0 及其相关内容为主, 不包括 IEC60909-3。PSASP 短路计算可以分为“基于方案”和“基于潮流”两种方式^[8], 其差别主要在于前者在计算时不考虑负荷影响, 而后者考虑负荷影响。由于在 IEC60909 中考虑了负荷元件, 因此本文采用 PSASP 基于潮流计算短路时的情况与之进行对比。

1 计算内容

IEC60909 对三相交流系统短路计算进行了较为全面的规定, 其中主要的计算量有:

- I_k'' 为对称短路电流初始值, 有效值;
- $i_{d.c}$ 为短路电流直流分量;
- i_p 为短路电流峰值;
- I_b 为对称开断电流, 有效值;
- I_k 为稳态短路电流, 有效值。

在标准中将短路分为“近端短路”和“远端短路”两种情况, 主要区别是前者在计算 I_b 、 I_k 时在一定条件下要考虑周期分量电流的衰减。

PSASP 的短路计算结果是短路电流周期分量的初始值, 相当于 IEC60909 中的 I_k'' , 由于只是故障时刻的结果, 因此没有是否衰减的问题。

2 计算假定

IEC60909 和 PSASP 在计算时, 均认为在短路持续时间内:

1) 短路相数不变, 如三相短路保持三相短路, 单相接地短路保持单相接地短路;

2) 网络没有改变;

不同之处是:

1) IEC60909 中通常忽略线路电容、并联导纳和非旋转负荷, 对于它们的影响实际在设置故障点电压源时进行概略考虑。PSASP 在进行系统建模时对上述因素全部考虑, 但认为发电机不存在零序通路。

2) IEC60909 对具有分接头的变压器, 认为其抽头在主分接位置, 同时引入变压器阻抗修正因子 K_T 。PSASP 对于变压器分接头按其实际位置在数学模型中予以考虑。

3) IEC60909 在计算中不计电弧电阻, PSASP 可考虑过渡阻抗影响。

3 数学模型

3.1 概述

IEC60909 和 PSASP 在可考虑的元件类型方面基本相当。IEC60909 对于各种元件的处理方法基本是以元件铭牌参数为变量建立通用模型, 而后以相应系数进行修正。通过选取不同的系数值, 可以求取系统的最大和最小短路电流。PSASP 则是提供若干个数学模型, 由用户根据实际情况来选取, 其中的参数可能是铭牌参数, 也可能需要实测。如果要求系统的最大或最小短路电流, 需要对运行方式和元件参数进行调整。

下面就两者电源、变压器、交流线, 以及负荷等方面的数学模型作一简要讨论。

3.2 电源的数学模型

3.2.1 IEC60909 中与电源有关的元件数学模型

在 IEC60909 中与电源有关的元件数学模型主要有发电机、馈线网和发电厂单元(发变组), 它们的模型均不含电压源或电流源, 都是一个接地的阻抗。这是因为在计算时, 在故障点处会加入一个等值电压源, 相当于是模拟了开路电压, 其数值为

$$\frac{cU_n}{\sqrt{3}} \tag{1}$$

其中: c 为电压因数, 标准中提供了参考取值。 U_n 为故障点系统电压有名值。

对于发电机,

$$\dot{Z}_{GK} = K_G \dot{Z}_G \tag{2}$$

其中: K_G 为修正因数; \dot{Z}_G 为发电机次暂态阻抗向量; \dot{Z}_{GK} 为修正后的发电机次暂态阻抗向量。

发电机负序和零序阻抗的处理与 \dot{Z}_{GK} 相类似, 只是将 \dot{Z}_G 更换为相应的序阻抗向量。

对于馈线网, 其等值阻抗 \dot{Z}_Q 实际是由接入点看进去的系统戴维南等值阻抗与电压因数 c 的乘积。认为馈线网正序阻抗与负序阻抗相等, 一般不考虑零序阻抗。如果其电压在 35 kV 以上, 可以忽略电阻的影响。

IEC60909 中将发电厂的单元接线(发变组)按升压变有、无有载调压分接头分为两类, 计算公式分别如下:

有有载调压分接头:

$$\dot{Z}_S = K_S (t_r^2 \dot{Z}_G + \dot{Z}_{THV}) \tag{3}$$

无有载调压分接头:

$$\dot{Z}_{SO} = K_{SO} (t_r^2 \dot{Z}_G + \dot{Z}_{THV}) \tag{4}$$

其中:

\dot{Z}_S 、 \dot{Z}_{S0} 为单元接线的等值阻抗向量; K_S 、 K_{S0} 为修正因数, 标准中提供了计算公式; t_r 为变压器额定变比; \dot{Z}_{THV} 为不考虑修正因数 K_T 折算到高压侧的变压器阻抗向量。

两者的主要差别在于 K_S 和 K_{S0} 的求法。

3.2.2 PSASP 中与电源有关的模型

PSASP 中短路点的开路电压是在建立全网模型后, 由网络中电源提供的注入电流和网络方程计算得到的, 因此在电源模型中包含等值电压(电流)源。PSASP 中含有等值电压源的元件主要有发电机、外部等值系统和有感应电动机成分的负荷。感应电动机在 3.4.2 中讨论, 这里先讨论前两者, 它们分别与 IEC60909 中的发电机和馈线网相对应。在 PSASP 中不包括发变组的专用模型, 对于该种情况采用对发电机和变压器分别建模的方式模拟。

PSASP 中应用于短路计算的发电机模型, 可表示为一个等值电压源与一个等值阻抗串联的形式, 如图 1 所示。

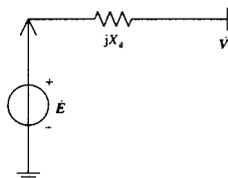


图 1 PSASP 中发电机的等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of the generator in PSASP

其中: \dot{V} 为发电机端电压向量; X_d 为发电机等值电抗; \dot{E} 为发电机电抗后等值电势向量。

根据简化程度的不同一般所采用的发电机模型可分为 0~6 七个类型。由发电机功率和端电压 \dot{V} 可以计算出 \dot{E} 和 X_d , 采用不同的模型得到的结果会不尽相同。

对于外部系统, PSASP 也认为其正序和负序阻抗相等, 一般可采用等值发电机—变压器组的形式模拟。发电机模拟电势源, 变压器模拟外部系统正、负、零序等值阻抗。

3.3 交流线和变压器的数学模型

IEC60909 未包括线路正、负序对地电容, 但在计算方法中给予了考虑。对于线路的零序对地电容除了在高、中压中性点不接地、谐振接地和接地故障因数大于 1.4 时以外均不考虑。

PSASP 可考虑线路的正、负、零序阻抗和对地电容, 还可考虑线路零序互感的影响。

对于单独建模的两绕组和三绕组变压器,

IEC60909 与 PSASP 的处理在实质上并无不同。只是前者的模型中不考虑分接头变化, 理想变压器被忽略, 后者则根据用户输入的变压器分接头数据进行计算, 得到标么变比和变压器阻抗。

3.4 负荷的数学模型

3.4.1 IEC60909 中负荷的数学模型

IEC60909 中提供的与负荷有关的数学模型主要有同步电机、异步电机和非旋转负荷。

对于同步电机, 如果有电压调整措施可按同步发电机处理, 如果没有则需根据情况处理, 标准中没有给出很详细的说明。

对于异步电机, 其等值电路依然是一个接地阻抗, 正、负序值可按下式计算:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (5)$$

其中: U_{rM} 、 I_{rM} 和 S_{rM} 分别为异步电机的额定电压、额定电流和额定视在功率; I_{LR}/I_{rM} 为异步电机堵转电流与额定电流的比值。

零序电抗一般由制造商提供。

此外, 在标准中还规定了多种不能或可以忽略异步电机影响的情况, 例如在计算最大短路电流时, 中压异步电机不能忽略。

对于非旋转负荷除了对零序系统有影响的以外, 一般予以忽略。

3.4.2 PSASP 中负荷的数学模型

PSASP 中一共有 7 种负荷模型, 在短路计算当中常用到的有恒阻抗、感应电动机和负荷静特性三种模型, 而且一个负荷中可以一部分按恒阻抗另一部分按其它模型考虑, 也就是说这里的“负荷”实际是一个等值的负荷。

对于恒阻抗负荷, PSASP 认为其等值电路为一个接地的电抗, 正序值可由负荷功率与端电压计算得到, 负序值为正序值的 0.35 倍, 忽略零序阻抗。

对于感应电动机模型, 其等值电路如图 2。

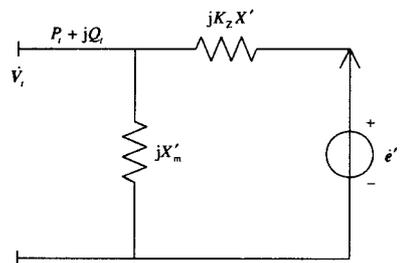


图 2 PSASP 中感应电动机的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of the motor in PSASP

其中： P_1 、 Q_1 为感应电动机的有功和无功功率； X'_m 为感应电动机内等值电抗； X'_m 为由机端无功与感应电动机模型无功差值得到的电抗； K_z 为将机组本身基值的阻抗转换为系统基值阻抗的系数； e' 为感应电动机内等值电势向量； \dot{V}_1 为感应电动机机端电压向量。

各参数的计算参见文献[12]。由于有 e' 存在，感应电动机会对系统提供反馈电流。

对于负荷静特性的处理参见文献[12]，与感应电动机不同的是该种负荷不会对系统产生反馈电流。

4 计算方法

对于故障点的短路电流，IEC60909 与 PSASP 的计算方法在本质上是一致的，都是基于对称分量法由故障点的复合序网进行计算。

对于三相短路情况 IEC60909 根据发生故障网络的不同而将计算分为两类，一类是在辐射型网络中的计算，一类是网状网络。对于前者，标准推荐采用叠加法进行计算，即先计算出各支路的短路电流再将它们累加，

$$i_k'' = \sum_i i_{ki}'' \quad (6)$$

其中： i_{ki}'' 为与短路点相连的各支路的初始对称短路电流矢量。

在标准的精度要求范围内，也可以是模值相加。对于后者，一般需要对网络进行化简后再进行计算，如果连接两个系统的变压器的变比稍有不同，可以使用它们的算数平均值。

对于不对称短路，IEC60909 认为系统正序等值阻抗与负序等值阻抗相等的简化是可以接受的。特别的，对于两相接地短路，如图 3 所示。

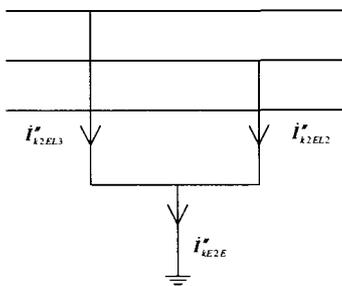


图 3 IEC60909 中的两相接地短路

Fig.3 Line-to-line short circuit with earth connection in IEC60909

IEC60909 提供了 i_{k2EL2}'' 、 i_{k2EL3}'' 和 i_{kE2E}'' 的计算方法，国内通常采用的计算方法^[9, 10]一般不计算 i_{kE2E}'' 。

PSASP 采用基于稀疏矩阵技术的计算机处理算法，根据各个元件的数学模型和参数，形成全网导纳阵，而后加入故障进行求解^[10,11,13]。得到的结果完全取决于网络结构、元件参数和故障类型，可以处理多个同种或不同种故障同时发生的情况，可得到故障点电流和全网支路电流和母线电压。

5 算例比较

5.1 算例数据

本文采用 IEC60909-4 中提供的 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV 系统进行了 IEC60909 与 PSASP 的比较计算。该算例专门用于验证以 IEC60909 标准编写的计算程序，包括了相关参数和最严重的三相、单相短路计算故障点电流结果。系统接线图如图 4 所示。

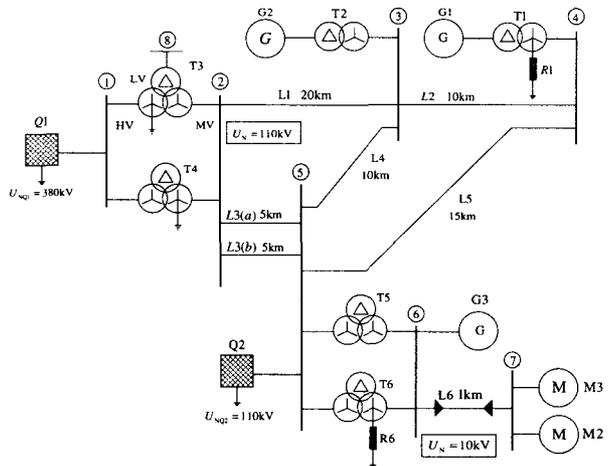


图 4 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV 高压交流系统图

Fig.4 High-voltage test network 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV

元件参数见文献[5]。

为进行比较，在 PSASP 7.0 程序中建立了该系统。由于 IEC60909 与 PSASP 在元件模型方面的差别，建数过程中对系统进行了如下处理：

- 1) 系统中所有元件的参数均不考虑修正因数，例如 K_T 等；
- 2) 所有变压器均未设置分接头数据，并对 u_{krHVLV} 、 u_{RrHVLV} ^[5]等参数按 PSASP 的要求进行了折算；
- 3) 将馈线网 Q1 和 Q2 用发电机—变压器组代

替, 阻抗采用不考虑因数 C 的值;

4) 在原始数据中没有提供线路的正序和零序对地电容, 因此采用了类似线路的参数;

5) 在原始数据中异步电机 M3 和 M2 的参数对于 PSASP 来说不够用, 因此依据典型参数进行了补充;

6) 发电机采用模型 0。

5.2 计算结果

在进行短路计算之前首先进行潮流计算, 由于

在算例中没有给出 Q1 和 Q2 的功率, 因此将这两点的等值发电机设置为平衡节点 (slack), 给出额定功率的 G1、G2、G3、M1 和 M2 均按其额定功率和功率因数设置为 PQ 节点。

完成潮流计算后进行短路计算, 由于 IEC60909-4 中只提供了①-③母线的三相短路结果和②-⑤母线的单相短路结果, 因此在 PSASP 7.0 中也仅对这些点进行比对计算。

计算结果如表 1、表 2。

表 1 三相短路计算结果对比

Tab.1 Comparison of three-phase short-circuit results

故障点	IEC60909 结果 (I_k'' /kA)	PSASP 计算结果 (I_{k_PSASP}'' /kA)	差值 ($\Delta = I_k'' - I_{k_PSASP}''$ /kA)	差值百分比($\frac{\Delta}{I_k''}$ %)
①	40.644 7	39.448 1	1.196 6	2.944
②	31.783 1	29.812 4	1.970 7	6.200 4
③	19.673	18.746 8	0.926 2	4.708
④	16.227 7	15.692 9	0.534 8	3.295 6
⑤	33.189 4	31.886 7	1.302 7	3.925
⑥	37.562 9	35.256 5	2.306 4	6.140 1
⑦	25.585 9	23.675 6	1.910 3	7.466 2
⑧	13.577 8	11.734 4	1.843 4	13.576 6

表 2 单相短路计算结果对比

Tab.2 Comparison of line-to-earth short-circuit results

故障点	IEC60909 结果 (I_k'' /kA)	PSASP 计算结果 (I_{k_PSASP}'' /kA)	差值 ($\Delta = I_k'' - I_{k_PSASP}''$ /kA)	差值百分比($\frac{\Delta}{I_k''}$ %)
②	15.972 2	16.180 4	-0.208 2	-1.303 5
③	10.410 6	10.321 4	0.089 2	0.856 8
④	9.049 8	8.986 4	0.063 4	0.700 8
⑤	17.045 2	17.242 5	-0.197 3	-1.157 5

5.3 结果分析

由于在数学模型和计算方法上的差异, IEC60909 和 PSASP 的短路计算结果显然不会完全一致, 但也不会有很大的差别。从计算结果来看除了母线⑧的三相短路计算结果以外, 其余所有计算结果的“差值百分比”均小于 10%。

引起计算结果有差别的原因, 主要有以下几点:

1) 元件模型带来的误差, 例如, 对于感应电动机;

2) 应用典型参数带来的误差, 例如, 交流线和感应电动机中采用的典型参数可能与实际情况不

一致;

3) 运行方式选取带来的误差, IEC60909 的结果实际是对最大短路电流的“估算”, 因此没有提供系统运行方式的详细数据, 例如, 感应电动机的实际出力。这使得在 PSASP 计算时无法确定短路电流最大的运行方式, 只能根据发电机和负荷的额定值进行估计, 因此会带来误差。例如, 对于母线⑧的开路电压 PSASP 计算出的结果为 0.9469 9 p.u., 而 IEC60909 的处理相当于认为该处的开路电压为 1.1 p.u.。

6 结论

本文从计算内容、计算假定、数学模型和计算

方法等方面比较了 IEC60909 与 PSASP 短路计算的相似与不同, 并通过算例进行了进一步说明。综上所述, 可以得到以下结论:

1) IEC60909 提供的是在满足工程精度的条件下, 对系统短路电流进行“估算”的方法。这种方法在参数取值、计算算法等方面较为简便, 但在因数计算和对复杂电网的处理方面比较麻烦。

2) PSASP 基于潮流的短路计算采用的是理论上较为完备的元件数学模型和计算方法, 计算结果对应于系统一个确定状态。这种方法对复杂电网的处理比较方便, 计算精度较高, 结果可以直接用于暂态稳定计算, 但参数取值较为麻烦。如果希望得到系统的最大短路电流, 需要进行多个运行方式的计算, 而运行方式的选取还有待于确定一个理论上较为完备的规则。

3) PSASP 计算的是在远端短路条件下, 初始对称短路电流有效值 I_k^* 。IEC60909 提供了短路过程中更为丰富的各种变量的计算方法。

4) IEC60909 与 PSASP 短路算法在本质上相类似, 对于一个确定的电网, 两者故障点短路电流计算结果差别不大。

参考文献

[1] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 0: Calculation of Currents[S]. IEC, 2001.

[2] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 1: Factors for the Calculation of Short-circuit Currents According to IEC 60909-0[S]. IEC, 2002.

[3] Electrical Equipment-Data for Short-circuit Current Calculations in Accordance with IEC 909(1988)[S]. IEC, 1992.

[4] International Standard Short-circuit Currents in Three-phase a.c. Systems-Part 3: Currents During two Separate Simultaneous Line-to-earth Short Circuits and

Partial Short-circuit Currents Flowing Through Earth[S]. IEC, 2003.

[5] International Standard Short-circuit Currents in three-phase a.c. Systems-Part 4: Examples of Short-circuit Currents[S]. IEC, 2001.

[6] GB/T 15544-1995, 三相交流系统短路电流计算[S].

[7] 电力系统分析综合程序(6.1版)暂态稳定计算用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[8] 电力系统分析综合程序(6.1版)短路计算用户手册 [Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[9] 何仰赞, 温增银, 汪馥瑛, 等. 电力系统分析, 修订版上册[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.

[10] 周孝信, 李汉香, 吴中习. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 1989.

[11] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 一种可用于大型电力系统数字仿真的复杂故障并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 1-5.
LI Ya-lou, ZHOU Xiao-xin, WU Zhong-xi. A Parallel Complex Fault Computation Algorithm for Large Scale Power System Digital Simulation[J]. China Electric Power Research Institute, 2003, 23(12): 1-5.

[12] 电力系统分析综合程序(6.1版)基础数据库用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院电网数字仿真技术研究所, 2001.

[13] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2008-09-13

作者简介:

黄彦浩 (1978 -), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统计算与分析; E-mail: hyhao@epri.ac.cn

施浩波 (1977 -), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统计算与分析;

安宁 (1978 -), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统计算与分析。

(上接第 68 页 continued from page 68)

DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al. Object-oriented to Fast Tracking of Topology for Power System(Part 1) [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 178-181.

[12] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪(二) [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 283-287.

DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, et al.

Object-oriented to Fast Tracking of Topology for Power System(Part 2)[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 283-287.

收稿日期: 2008-05-16

作者简介:

尹亮 (1979-), 男, 工程师, 主要从事电网继电保护维护定检工作。E-mail: epyinliang@163.com