

## 电力系统变压器模型分析

姚玉斌<sup>1</sup>, 吴志良<sup>1</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 李洪<sup>2</sup>, 郭峰<sup>3</sup>(1. 大连海事大学自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 烟台市产品质量监督检验所, 山东 烟台 264000;  
3. 宝鸡供电局凤县供电分局, 陕西 凤县 721700)

**摘要:** 目前广泛使用的理想变压器串联一个恒定等值阻抗的变压器模型, 一般只以等值阻抗是否位于变压器标准变比侧来区分, 而没有考虑等值阻抗是位于可调分接头侧还是位于固定抽头侧的问题。分析与计算表明, 当变压器分接头变化时, 变压器模型的等值阻抗是否位于可调分接头侧, 计算结果有较大不同, 说明了等值阻抗与它是否在可调分接头侧关系很大。实际上, 变压器绕组的漏抗和电阻是随着分接头调整而变化的, 选取能反应这种变化关系的变压器模型是十分必要的。通过对变压器模型中等值阻抗性质的分析, 认为采用等值阻抗在固定抽头侧的变压器模型是合理的。

**关键词:** 变压器模型; 等值阻抗; 可调分接头; 固定抽头

## Study on transformer representation in power system

YAO Yu-bin<sup>1</sup>, WU Zhi-liang<sup>1</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>, GUO Feng<sup>3</sup>

(1. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Yantai Products Quality Supervision and Inspection Institute, Yantai 264000, China; 3. Fengxian Branch, Baoji Power Electric Company, Fengxian 721700, China)

**Abstract:** Presently in transformer model, it is considered mainly whether the equivalent impedance is assigned to the side of normal ratio, but seldom whether the equivalent impedance is on the side of on-load tap changer. The calculation results show that there is much difference between the model whose equivalent impedance being on the side of on-load tap changer and the one on the side of fixed tap, and this conclusion is also proved by theoretical analysis. Actually, both leakage reactance and resistance of a transformer winding varies with the tap position, so it is necessary to choose an appropriate transformer model which can reflect this relation. The analysis on equivalent impedance of the transformer model indicates that the transformer model with its equivalent impedance being on the side of fixed tap is rational one.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60674037).

**Key words:** transformer model; equivalent impedance; on-load tap changer; fixed tap

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0016-05

## 0 引言

电力网络的数学模型是现代电力系统分析的基础<sup>[1]</sup>。对电力网络的描述和处理往往成为解决有关问题的关键, 其中对电力网络中各元件的模型描述和参数计算又是非常重要的一个方面。变压器是电力系统中最重要电气装备之一, 同时也是使用较多的设备。通常, 变压器的安装容量约为发电机安装容量的6~8倍。对于电力系统中应用如此广泛的变压器设备, 正确描述其模型, 确定它的准确参数是非常重要的。

目前, 在电力系统分析中, 计算机计算的变压器模型广泛采用一个无损耗理想变压器串联一个恒定阻抗的模型(本文称为理想变压器模型)和II型等值电路, 如图1所示, 图中未包含励磁支路, 励磁支路通常略去或另作处理。图1(a)为一种理想变压器模型, 图1(b)为其II型等值电路。图中,  $i$ 侧为原边,  $j$ 侧为副边, 变压器的阻抗 $Z_T = R_T + jX_T$ 是折算到副边的值, 导纳 $Y_T = 1/Z_T$ ,  $k = V_{iN}/V_{jN}$ 是变压器的变比,  $V_{iN}$ 和 $V_{jN}$ 分别为原、副边当前分接头的空载电压,  $V_i$ 和 $V_j$ 分别为原、副边实际电压。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60674037)

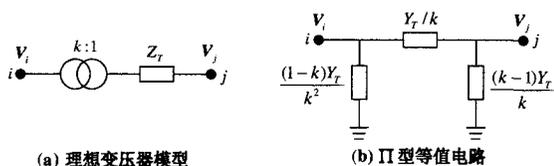


图 1 变压器等值电路—模型 1

Fig.1 Equivalent circuit for a transformer-model I

目前使用理想变压器模型时, 人们往往关心两个问题: ① 标准变比是在变压器首端还是在末端; ② 等值阻抗是位于标准变比侧, 还是位于非标准变比侧。综合这两个问题, 可以给出四种模型。为了分析简单明了, 本文依据后者, 把目前常用的理想变压器模型分为两种形式: 一种为等值阻抗在标准变比侧的模型<sup>[1~3]</sup>, 见图 1(a), 为了叙述方便, 称为模型 1, 其Π型等值电路为图 1(b); 另一种为等值阻抗在非标准变比侧的模型<sup>[4]</sup>, 见图 2(a), 称为模型 2。其它变压器模型都可以通过互换首末端点号, 转化成模型 1 或模型 2。

上述两种变压器模型可以相互转化, 模型 1 转化成模型 2 时, 通过变换阻抗  $Z'_T = Z_T k^2$ , 可得到图 2(a) 的模型; 或者通过变换变比  $k' = 1/k$ , 得到图 2(b) 的模型。模型 2 这两种形式只是首末端点号互换了, 但都是等值阻抗位于非标准变比侧, 属于同一种类型, 它们形成Π型等值电路的形式也是相同的。

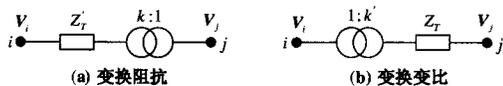


图 2 变压器等值电路—模型 2

Fig.2 Equivalent circuit for a transformer - model II

模型 2 的这两种形式的Π型等值电路分别为图 3(a) 和 3(b), 在图 3(a) 中考虑到  $Z'_T = Z_T k^2$ ,  $Y'_T = 1/Z'_T = Y_T/k^2$ , 在图 3(b) 中考虑到  $k' = 1/k$ , 可以得出, 由模型 1 和模型 2 得到的Π型等值电路是完全相同的。说明模型 1 与模型 2 的上述转化是等价的。

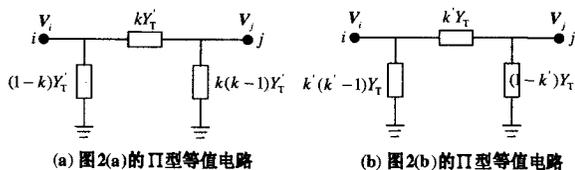


图 3 模型 2 的Π型等值电路

Fig.3 Pi-equivalent for model II

### 1 变压器分接头变化对变压器模型中等值阻抗的影响

为了适应电力系统运行调节的需要, 通常在变压器的高压绕组上设计制造有分接头, 三绕组变压器的中压或低压绕组一般也设置分接头。系统运行时, 电力变压器不一定运行在主接头位置上, 并且运行的分接头位置也不是一成不变的。所以, 选取变压器模型时应该考虑分接头对变压器模型的影响。

变压器分接头的调整不仅改变变压器变比, 而且对变压器漏抗和电阻也有很大影响。但目前在电力系统分析中使用理想变压器模型, 一般都主要考虑等值阻抗是位于标准变比侧, 还是位于非标准变比侧的问题, 而很少考虑分接头对等值阻抗的影响, 即没有考虑等值阻抗是在可调分接头侧, 还是在固定抽头侧的问题。实际上, 分接头对等值阻抗的影响是很大的。

在图 1(a) 和图 2(a) 所示的变压器模型中, 设  $i$  为可调节变比侧, 考虑可调分接头后, 图 1(a) 的等值阻抗位于固定抽头侧, 本文称为模型 3; 图 2(a) 的等值阻抗位于可调分接头侧, 本文称为模型 4。至于标准变比在哪一侧不影响分析结果, 即图 1(a) 中把理想变压器的变比  $k:1$  变成  $1:(1/k)$ , 分析结果也与模型 3 相同。

变压器模型中的等值阻抗  $Z_T$  一般是由主接头下的短路数据得到的。计算出等值阻抗  $Z_T$  后, 就得到了模型 3, 通过转化, 可以得到模型 4。这两种变压器模型在当前变比和阻抗条件下是等效的。如果变压器不运行在主接头位置时, 相当于变比  $k$  变化了, 那么仍然使用主接头下的等值阻抗, 两种模型就不再等效了, 计算出来的结果就会有很大不同。下面分析一下当变压器不在主接头位置运行时, 两种模型的等值阻抗差异。

设变压器在主接头位置运行时, 变压器变比为额定变比  $k_0$ , 模型 3 的等值阻抗为  $Z_{T0}$ , 模型 4 的等值阻抗可由模型 3 转化得到, 为  $k_0^2 Z_{T0}$ 。当变压器在分接头位置运行时, 变压器变比变为  $k$ , 由于模型中等值阻抗采用恒定阻抗, 模型 3 的等值阻抗仍为  $Z_{T0}$ , 模型 4 的等值阻抗仍为  $k_0^2 Z_{T0}$ 。为了比较, 把模型 3 转化为其等价的模型 4, 其等值阻抗为  $k^2 Z_{T0}$ , 此等价模型 4 的等值阻抗与模型 4 的等值阻抗的差就是模型 3 与模型 4 的等值阻抗之差。

因此, 当变压器变比由  $k_0$  变成  $k$  时, 两种模型的阻抗差为:

$$\Delta Z_{T0} = (k^2 - k_0^2) Z_{T0} = (m^2 - 1) Z'_{T0}$$

式中:  $k_0$  为额定变比, 即主接头下的变比;  $k$  为当

前变比,即当前分接头下的变比;  $m = k/k_0$  为变比倍数,当前变比与额定变比的比值;  $Z_{T0}$  为主接头下模型 3 的等值阻抗;  $Z'_{T0}$  为主接头下模型 4 的等值阻抗。

两种模型的相对阻抗差为:

$$\eta = \Delta Z_{T0} / Z_{T0} = m^2 - 1$$

以 SFZ9-50000/110 $\pm$ 8 $\times$ 1.5% 的变压器(主接头上各 8 挡分接头、每挡步长为 1.5%)为例,分析一下分接头变化时,两种模型等值阻抗的差值,结果见表 1。从表 1 的数据可见,两种模型等值阻抗的差异是比较明显的。

表 1 变压器各分接头下两种变压器模型中等值阻抗的差异

Tab.1 The difference between the impedance of two transformer models at different transformer tap

挡位	-8	-6	-4	-2	-1	0	1	2	4	6	8
$k/k_0$	0.880	0.910	0.940	0.970	0.985	1.000	1.015	1.030	1.060	1.090	1.120
$\eta/(%)$	-22.56	-17.19	-11.64	-5.91	-2.98	0.00	3.02	6.09	12.36	18.81	25.44

## 2 变压器分接头位置变化对变压器阻抗影响的物理分析

从表 1 的比较结果,可以看出当分接头位置发生变化时,变压器模型的等值阻抗是否位于可调分接头侧,计算结果的差别是很大的,也就是说,分接头对变压器模型的影响是非常明显的。

变压器模型中的等值阻抗参数,是由短路试验得到的短路损耗和短路电压计算出来的。目前使用的短路数据都是主接头下得到的数据。但变压器的短路数据不是一个定值,它随着变压器分接头变化而变化<sup>[3]</sup>。因而分接头下短路数据计算出的等值阻抗与主接头下的试验数据计算出来的等值阻抗是不同的。

图 4 是双绕组变压器的基本等值电路,其原边与副边都有漏抗和电阻。下面以双绕组为例分析变压器等值阻抗与分接头的变化关系:

1) 变压器  $i$  侧分接头的变化就意味着变压器该侧的绕组匝数变化,绕组匝数变化要引起阻抗变化,即  $Z_{T10}$  变为  $Z_{T1}$ ,  $Z_{T20}$  不变。

2) 模型 3 的等值阻抗为副边阻抗和折算到原边的原边阻抗值之和,折算值与变比的平方成正比;模型 4 的等值阻抗为原边阻抗和折算到原边的副边阻抗值之和,折算值与变比的平方成反比。

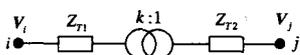


图 4 变压器基本等值电路

Fig.4 Basic equivalent circuit for a transformer

以上两个因素都要引起变压器等值电路的等值阻抗变化。当前分接头下,模型 3 的等值阻抗为  $Z_T = Z_{T1}/k^2 + Z_{T20}$ ; 模型 4 的等值阻抗为  $Z_T = Z_{T1} + Z_{T20}k^2$ , 这里  $Z_{T1}$ 、 $k$  与主接头的  $Z_{T10}$ 、 $k_0$  不同。因此,在当前分接头下得到的等值阻抗与主

接头的等值阻抗不同。

## 3 变压器模型的选取

从上述分析可见,变压器模型中的等值阻抗是随着分接头的调整而变化的,因此,为了精确描述变压器的等值阻抗,应该测得每个分接头下的短路损耗和短路电压,从而计算出各个分接头对应的等值阻抗。这样就可以得到准确的变压器模型。但国家标准(GB1094.1-85)只要求厂家提供主接头下的短路损耗和短路电压<sup>[6]</sup>,一般情况下,厂家也仅提供主接头下的短路损耗和短路电压。因此需要利用主接头下的短路损耗和短路电压,建立一个能够正确反映等值阻抗随分接头调节而变化的变压器模型。

一般情况下,变压器的漏抗基本上与变压器该侧绕组匝数的平方成正比<sup>[5]</sup>,电阻则与绕组匝数成正比,但由于电阻相对于漏抗很小,可以认为变压器阻抗与变压器该侧绕组匝数的平方成正比。也就是说,当变压器另一端分接头固定时,变压器分接头调整侧的阻抗与变压器变比平方成正比。

由图 4 可见,模型 3 的等值阻抗为:  $Z_T = Z_{T1}/k^2 + Z_{T2}$ , 这里,由于  $Z_{T2} = Z_{T20}$ 、 $Z_{T1} = Z_{T10}(k^2/k_0^2)$ , 则  $Z_T = Z_{T10}(k^2/k_0^2)/k^2 + Z_{T20} = Z_{T0}$ , 等值阻抗不随变比变化而变化。

模型 4 的等值阻抗为:  $Z_T = Z_{T1} + Z_{T2}k^2$ , 由于  $Z_{T2} = Z_{T20}$ 、 $Z_{T1} = Z_{T10}(k^2/k_0^2)$ , 则有

$Z_T = Z_{T10}(k^2/k_0^2) + Z_{T20}k^2 = (k^2/k_0^2)(Z_{T10} + Z_{T20}k_0^2) = (k^2/k_0^2)Z_{T0}$ , 即等值阻抗要随变比变化而变化,并且与主接头下的阻抗有较大差别。等值阻抗的相对差为  $\eta = (k/k_0)^2 - 1$ , 等于当前变比下模型 3 与模型 4 的等值阻抗差。从表 1 可以看出差别是很大的,因此采用模型 4 时,就不能认为等值阻抗是恒定的了。

通过以上分析,可知:在变压器绕组的阻抗与其匝数的平方成正比的假设条件下,模型 3 的等值

阻抗是恒定不变的, 而模型 4 的等值阻抗则需要随分接头调整而改变。由于变压器都基本满足这个假设条件, 因此采用模型 3 是合理的<sup>[5, 7]</sup>, 实际上国外一些著名调度自动化系统的厂家就是采用模型 3, 或采用图 5(a)所示的模型 5, 图 5(b)为模型 5 的 II 型等值电路。模型 5 对可调分接头位于低压侧, 或两侧都有可调分接头的变压器使用起来更加方便。IEC 61970 CIM 的双绕组变压器模型就采用模型 5 的形式<sup>[8]</sup>。

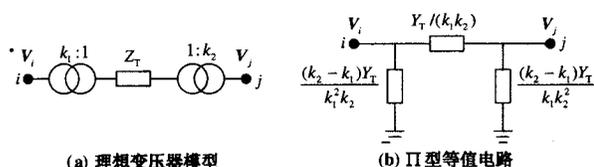


图 5 变压器等值电路—模型 5

Fig.5 Equivalent circuit for a transformer - model V

三绕组变压器中同一相的三个绕组漏磁通分布比较复杂, 等值电路的漏抗实际上为自漏抗与互漏抗共同作用而得到的等值漏抗。分析分接头变化对此等值阻抗的影响比较复杂, 但也能得到与双绕组变压器相同的结论, 即等值阻抗应该位于固定抽头侧。因此建议三绕组变压器采用三个变比的模型, 等值阻抗位于中性点侧, 这也是 IEC 61970 CIM 所采用的模型。国内通常采用的两个变比模型, 变比位于中、低压侧。通过以上分析, 可知当高压侧为可调分接头(而大部分变压器的高压侧都有可调节的分接头)时, 该模型是不合理的, 而采用三个变比的模型, 则无论可调分接头位于哪一侧, 使用起来都更加方便。

#### 4 不同的变压器模型对电力系统分析的影响

通过以上分析, 可知选取和使用变压器模型要考虑两个方面问题: 一是变压器等值阻抗是在标准变比侧, 还是在非标准变比侧; 另一个是变压器等值阻抗是在可调分接头侧, 还是在固定抽头侧。其中第一个问题是算法和计算阻抗都需要考虑的问题; 第二个问题则影响电力系统分析的计算结果。

变压器模型是否考虑分接头影响对不同的应用软件的影响是不同的。

##### 1) 电力系统离线分析

电力系统离线分析算法中, 变压器模型的变比和阻抗都是给定的。在这种条件下, 只要在算法中不需要调整变比(即不需要调节变压器分接头), 那么变压器模型是否考虑分接头的影响对计算结果没

有影响。因此, 这类算法选择变压器模型时, 一般不需要考虑分接头影响。这类软件包括潮流计算、短路计算、安全分析等。但用户准备数据时需要注意: 对模型 3, 给定变压器主接头的等值阻抗; 对模型 4, 应该提供按当前变比折算的等值阻抗, 否则将会导致计算结果存在较大误差。

对于需要调整变比的算法, 不考虑分接头的影响, 则会产生较大误差。例如无功优化需要调整变比(即调节分接头)来达到降低系统网损和提高电压合格率的目的。如果采用模型 4, 那么无论如何给定变压器参数, 计算结果都会产生误差。因此, 这类算法选择变压器模型时, 就不能简单照搬传统的潮流计算的变压器模型。

##### 2) 电力系统在线分析

电力系统在线分析的变压器模型目前一般也是沿用传统的潮流计算的变压器模型, 没有考虑分接头的影响。实际上, 在线软件算法中, 包括状态估计、调度员潮流等, 变压器的等值阻抗无论用户直接给定, 还是程序自动计算, 一般都是通过变压器主接头下的短路数据求得的。运行时, 变压器却不一定运行在主接头, 采用模型 4 的计算结果就会有误差。

因此, 电力系统分析无论离线计算, 还是在线计算, 选用正确的模型都是很重要的。对于需要考虑分接头调整的算法, 建议采用 IEC61970 CIM 的变压器模型<sup>[8]</sup>。

#### 5 结论

通过对双绕组变压器的基本等值电路分析, 可以看出分接头变化对变压器该侧的等值阻抗存在较大影响, 此等值阻抗是随变压器分接头位置变化而变化的, 因而变压器总的等值阻抗是随着分接头的调整而变化的。对于需要调整变压器变比的应用软件应该考虑分接头的调整对变压器模型的影响。

通常情况下, 只能得到主接头下的等值阻抗, 无法得到变压器各分接头下的等值阻抗, 很难精确地描述变压器模型。在这种情况下, 可以采用等值阻抗在固定抽头侧的模型, 此模型能够较好地描述变压器的阻抗随变压器分接头的变化关系, 从而得到符合实际的计算结果。

#### 参考文献

- [1] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.

- [2] 西安交通大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.  
Xi'an Jiaotong University, et al. The Calculation of Power Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- [3] 韩祯祥, 吴国炎. 电力系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.  
HAN Zhen-xiang, WU Guo-yan. Electric Power System Analysis[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001.
- [4] 何仰赞, 温增银, 汪馥瑛, 等. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.  
HE Yang-zan, WEN Zeng-yin, WANG Fu-ying, et al. Electric Power System Analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996.
- [5] Kundur P. Power System Stability and Control (影印版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [6] 中国电力企业联合会标准化部. 电力工业标准汇编电气卷(3)电机及变压器类[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.43-112.
- [7] 陈珩. 电力系统稳态分析(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
CHEN Heng. Electric Power System Static Analysis, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [8] 姚玉斌, 刘仲尧, 陈勇. 基于 CIM 的电力变压器模型分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 57-61.  
YAO Yu-bin, LIU Zhong-yao, CHEN Yong. A Study on Transformer Representation based on CIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 57-61.

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-07-26

作者简介:

姚玉斌(1965-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析和控制; E-mail: yyb@newmail.dlmu.edu.cn

吴志良(1963-), 男, 教授, 博士研究生, 主要从事船舶自动化系统的教学与研究;

王丹(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性系统控制、电力电子与电力传动。

(上接第 15 页 continued from page 15)

- [18] 徐丙垠, 李桂义, 李京, 等. 接收 GPS 卫星信号的电力系统同步时钟[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(3): 44-47.  
XU Bing-yin, LI Gui-yi, LI Jing, et al. Synchronous Clock in Power System by Receiving Signal From GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(3): 44-47.
- [19] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用 GPS 的输电线路行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 37-40.  
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Study of Transmission Line Fault Location Based on Traveling Waves and GPS Technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 37-40.
- [20] 曾祥君, 尹项根, 陈德树, 等. 基于整个输电网 GPS 行波故障定位系统的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 8-10, 16.  
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. GPS Traveling-wave Fault Location Systems for Transmission Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 8-10, 16.
- [21] Ancell G B, Pahalawaththa N C. Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 680-689.
- [22] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.  
DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, XU Bing-yin. Research of Fault Location Based on Current Travelling Waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [23] Magnago F H, Abur A. Fault Location Using Wavelets[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [24] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.  
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A New Double Terminal Method of Travelling Wave Fault Location Using Wavelet Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [25] Gale P F, Stokoe J, Crossley P A. Practical Experience with Travelling Wave Fault Locators on Scottish Power's 275 & 400kV Transmission System[A]. In: the Sixth International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Nottingham (UK): 1997. 192-196.
- [26] Gale P F, Taylor P V, Naidoo P, et al. Travelling Wave Fault Locator Experience on Eskom's Transmission Network[A]. In: the Seventh International Conference on Developments in Power System Protection[C]. Amsterdam (Netherlands): 2001. 327-330.

收稿日期: 2007-10-08

作者简介:

马超然(1963-), 男, 工程师, 主要研究方向为供用电及电力系统自动化。E-mail: chaoranma@163.com