

基于抑制短路电流的500 kV变压器中性点经小电抗接地的电抗选值研究

徐瑶台¹, 黄云辉¹, 潘小军²

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 近些年来, 我国电网规模日益扩大, 网架结构不断加强。由于成本相对较低, 500 kV变电站大都采用自耦变压器, 且中性点直接接地运行。然而, 在中性点直接接地的运行方式下, 部分500 kV变电站220 kV侧单相短路电流过高, 甚至高于三相短路电流, 对电网的安全稳定造成威胁。文章主要研究500 kV自耦变压器中性点由直接接地改为串接小电抗器接地后220 kV侧单相短路电流水平。构建了双电源模型对电力系统进行等效, 阐述了500 kV自耦变压器中性点串接小电抗限制220 kV侧单相短路电流的原理。并研究了不同站点变压器中性点加装小电抗对不同短路位置短路电流的影响能力。研究结果表明, 当电抗值选在10~25 Ω 之间时, 限流效果最为明显。

关键词: 单相短路电流; 三相短路电流; 自耦变压器; 小电抗;

Study on reactance selection of 500 kV transformer with neutral point grounded by small reactance based on restraining short-circuit current

XU Yaotai¹, HUANG Yunhui¹, PAN Xiaojun²

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2. Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430040, China)

Abstract: In recent years, the scale of China's power grid is expanding day by day, and the grid structure is constantly strengthened. Due to the relatively low cost, the 500 kV substation mostly adopts autotransformer, and the neutral point is directly grounded. However, when the neutral point is directly grounded, at parts of the 500kV substations, 220 kV single-phase short-circuit current is too high, even higher than the three-phase short-circuit current, which is a threat to the security and stability of power grid. This paper mainly study the current level of single-phase short-circuit on the 220 kV side of the 500 kV autotransformer, which is changed from the direct grounding to the series reactor. The dual power model is built as an equivalent power system, explaining the principle of 500 kV autotransformer with neutral point grounded through small reactance that can limit 220 kV single-phase short-circuit current. And the influence of the small reactance at the transformer of different stations on the short circuit current at different short circuit positions. The results show that when the reactance value is between 10~25 Ω , the current limiting effect is the mostly obvious.

Key words: single-phase short-circuit current; three-phase short-circuit current; transformer; small reactance

0 引言

随着电力需求的快速增长, 各级电压网架建设发展迅速, 500 kV网架结构大大增强, 同时也

带来了电力系统短路容量的问题。在高密度的负荷中心区域, 短路电流水平难以控制是电网向更高电压等级发展的主要矛盾。由于500 kV变压器

大量采用自耦变压器，且中性点直接接地，造成部分500 kV变电站单相短路电流高于三相短路电流的现象，成为限制电网安全运行和高速发展的主要因素^[1-2]。

由于单相短路发生的概率很高，因此必须重视，分析原因并采取措施抑制。要抑制这种情况发生，从改变变压器中性点接地方式的角度考虑，500 kV变压器中性点经小电抗器接地方式能有效抑制220 kV侧单相短路电流。

关于500 kV自耦变压器小电抗接地已有相关研究。文献[3]分析了一般500 kV自耦变压器保护的构成特点，重点讨论了如何简化其后备保护装置及其整定计算过程。文献[4]利用电磁暂态仿真软件EMTPE研究了变压器的过电压水平。通过分析计算了在系统正常和故障情况下中性点的过电压水平以及小电抗器的暂态电流，确定了避雷器的配置参数。文献[5]从中性点串入小电抗后改变系统的零序参数入手，分析研究了多个站点自耦变压器中性点同时加装小电抗时，得出了不同安装情形对各零序电流的影响均存在叠加效应的结论。文献[6]针对自耦变压器中性点加装小电抗接地方式，阐明了小电抗器的电抗值与单相短路电流的关系，得出500 kV变压器中性点经小电抗接地能有效抑制220 kV侧短路电流的结论。

本文首先对500 kV自耦变压器中性点加装小电抗限制短路电流的机理进行了理论分析；针对实际系统多电源的特点，构建了双电源模型对电力系统进行等效，通过220 kV发生单相短路和三相短路时的短路电流计算，研究了中性点串接小电抗对单相短路电流的影响。

1 220 kV侧故障电流偏高的主要原因

单相接地短路电路图如图1所示。应用对称分量法可以写出各序网络故障点的电压方程式，再根据单相接地短路时故障处的三个边界条件，可以求出单相短路电流公式为

$$I^{(1)} = \frac{3E}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (1)$$

式中， E 为发电机的等效正序电动势， $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 和

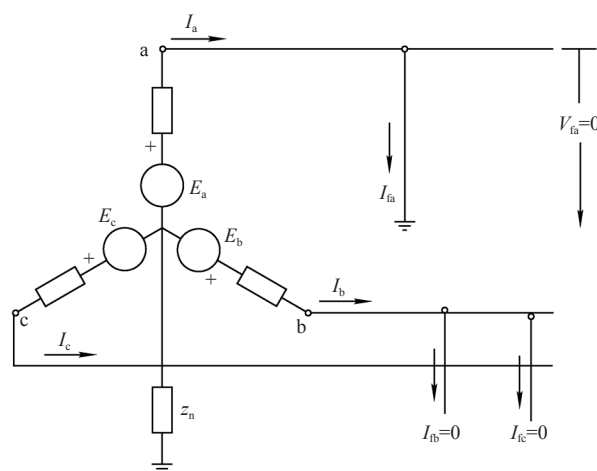


图1 单相接地短路电路图

Fig.1 Circuit diagram of single phase grounding short circuit
 $Z_{0\Sigma}$ 分别为从短路点向电源侧看进去的等效正序、负序和零序阻抗。

同理，根据三相短路时的边界条件可以求出三相短路电流为

$$I^{(3)} = \frac{E}{Z_{1\Sigma}} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可以看出，比较单相短路电流 $I^{(1)}$ 和三相短路电流 $I^{(3)}$ 的大小，可以通过比较 $Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}$ 和 $2Z_{1\Sigma}$ 的大小来判定^[7]。

电力系统元件分为静止元件和旋转元件。静止元件是相对于旋转元件而言的，主要包括架空导线、变压器和电容器等，它们的正序阻抗等于负序阻抗；而旋转元件主要包括同步发电机和异步电动机等，它们的正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗均不相等。所以 $Z_{1\Sigma}$ 和 $Z_{2\Sigma}$ 的差异主要是因为旋转元件的正序和负序阻抗不相等导致的。一般的短路点都是在输电线上，所以可以假设短路点远离电源，发电机的序阻抗在总的序阻抗中占的比重较小，可以认为 $Z_{1\Sigma} \approx Z_{2\Sigma}$ 。所以要比较单相短路电流 $I^{(1)}$ 和三相短路电流 $I^{(3)}$ 的大小，只需要比较 $Z_{0\Sigma}$ 和 $Z_{1\Sigma}$ 的大小^[8-9]，即

$$\frac{I^{(1)}}{I^{(3)}} = \frac{3Z_{1\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} = \frac{3}{2 + \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}} \quad (3)$$

$I^{(1)} > I^{(3)}$ ，说明 $Z_{0\Sigma} < Z_{1\Sigma}$ 。从发电机和变压器的接地方式及整个系统的阻抗和规模的角度进行

分析得出以下结论：

1) 电力系统规模越来越大，网络结构大大增强，各供电区域间的联系越来越紧密，导致故障电流增大。

2) 发电厂变压器的中性点大多是直接接地，发电机中不流过零序电流，零序网络也不包括发电机的零序阻抗，这就减小了变电站周围的零序电抗，增大了单相短路电流。

3) 随着电网规模的扩大，受段网络之间的联系越来越紧密，负载端的负荷密度也随之增大，500 kV变电站之间的联系更加紧密。各变电站之间的距离仅几十千米，使得线路阻抗变小，加大了三相短路电流小于单相短路电流的可能性。

4) 为了节约成本，自耦变压器大量应用于500 kV变电站，而自耦变中压侧的电抗值基本为零，导致220 kV侧母线单相短路电流高于三相短路电流^[10-12]。

2 中性点串接小电抗器对短路电流的影响

自耦变压器有单相的，也有三相的。分析单相自耦变压器运行时的电磁关系和电磁量，也适用于对称运行的三相自耦变压器的每一相。高、中压侧相当于双绕组自耦变压器，低压侧与高、中压侧之间只有磁的关系。高、中压侧因为共用了绕组 Z_1 ，所以高、中压侧既有电的联系，又有磁的联系，而普通三绕组变压器各绕组之间只有磁的联系^[13]。单相三绕组自耦变压器绕组接线图如图2所示。

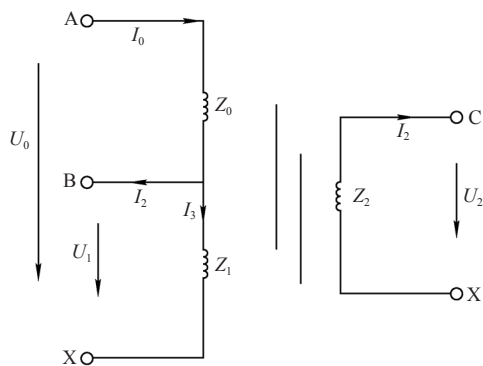


图2 单相三绕组自耦变压器绕组接线图

Fig.2 The winding wiring diagram of single-phase three winding autotransformer

自耦变压器一般有两个绕组有直接的电气联系，用来连接直接接地系统。应该注意的是，它们连接于同一个中性点，共用了同一条接地线。因此，中性点的电流不能直接通过折算的等效电路的电流来求取，而应该是3倍的高、中压侧绕组的零序电流实际有名值，即

$$I_n = 3(I_{1(0)} - I_{2(0)}) \quad (4)$$

当自耦变压器中性点接小电抗器时，不能像计算普通变压器那样，只考虑一个绕组对中性点电位的影响，应该考虑高压侧两个绕组对中性点电位的共同影响。所以，中性点所接的小电抗器对自耦变压器零序电路的影响也区别于普通变压器^[14]。

中性点经小电抗接地的自耦变压器电路及其零序等效电路如图3所示。图中，1、2和3分别表示从高到低压侧绕组代号； X_1 、 X_2 和 X_3 分别表示中性点直接接地时，自耦变压器各侧绕组的等效零序电抗； X_n 表示中性点所接的电抗器。

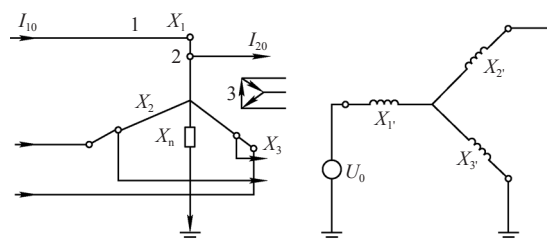


图3 中性点经小电抗接地的自耦变压器电路

Fig.3 The autotransformer circuit with neutral point grounded through small reactance

可求得各绕组折算到1侧的等效电抗为

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{1}{2}(x'_{1-2} + x'_{1-3} - x'_{2-3}) = x_1 + 3x_n(1 - k_{12}) \\ x'_2 &= \frac{1}{2}(x'_{1-2} + x'_{2-3} - x'_{1-3}) = x_2 + 3x_n k_{12}(k_{12} - 1) \\ x'_3 &= \frac{1}{2}(x'_{1-3} + x'_{2-3} - x'_{1-2}) = x_3 + 3x_n k_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可以看出，区别于普通变压器，中性点串接小电抗器的自耦变压器各侧等效零序电抗都受中性点所接电抗的影响，而普通变压器中性点所接电抗只影响所接入侧绕组的等效零序电抗^[15]。

3 仿真分析

针对实际系统多电源的特点，采用双电源模型对系统进行等效。用于仿真的系统单线图如图

4所示。利用电力系统分析综合程序PSASP对故障电流的计算结果进行对比分析。

图4中，与母线GEN3-500和GEN4-500相连

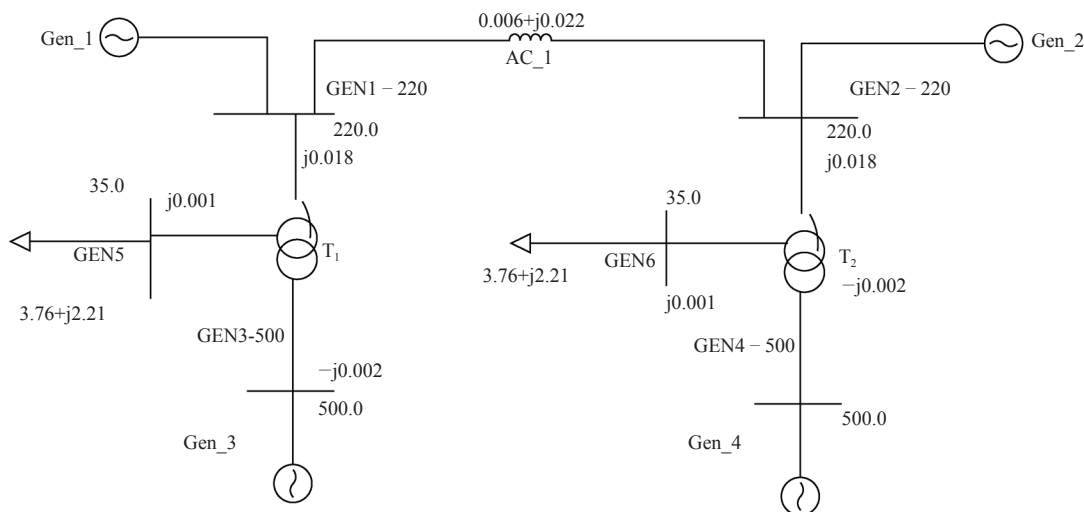


图4 500 kV系统等效模型

Fig.4 Equivalent model of 500 kV system

的变压器 T_1 和 T_2 都是500 kV自耦变压器。在变压器 T_1 中性点加装不同阻值的小电抗器，其220 kV侧线路不同位置短路情况如图5~图9所示。图5为短路点位于GEN1-220母线上的情况，图6为短路点距GEN1-220母线30%的情况，图7为短路点距GEN1-220母线70%的情况，图8为短路点距GEN2-220母线70%的情况，图9为短路点位于GEN2-220母线上。

根据图中的曲线可以看出，无论中性点是否加装相电抗器，对于同一短路点，220 kV侧的三

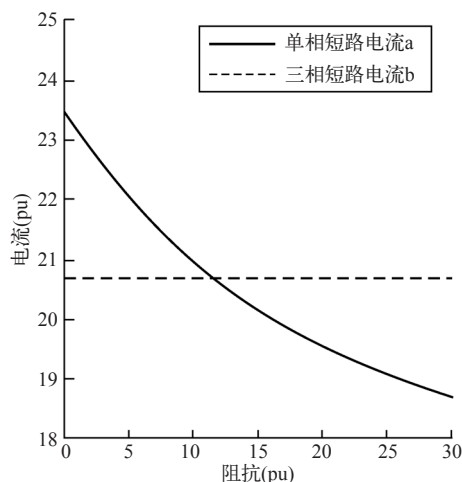


图6 短路点距GEN1-220母线30%

Fig.6 The short circuit point is far from the GEN1-220 bus 30%

相短路电流恒为一固定值，不会变化，即中性点加装小电抗器对220 kV侧三相短路电流无限制作用。单相短路电流下降明显，对其限制作用随着电抗值的增大慢慢接近饱和。由图5可以看出，当中性点的电抗值为25 Ω 时，对应的单相短路电流为18.661 (pu)；当中性点电抗值为30 Ω 时，对应的单相短路电流为18.184 (pu)；当电抗值为25 Ω 时，电流仅降低了0.477 (pu)；当电抗值高于25 Ω 时，限流效果不明显，也不经济。当

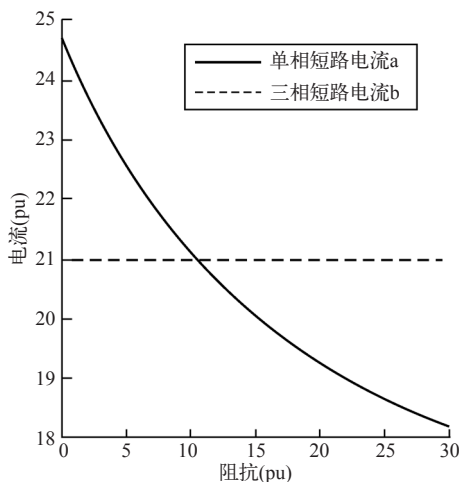


图5 短路点位于GEN1-220母线上

Fig.5 The short circuit point is located on the GEN1-220 bus

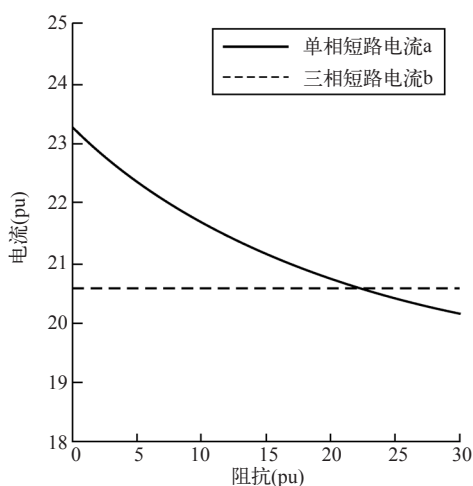


图7 短路点距GEN1-220母线70%

Fig.7 The short circuit point is far from the GEN1-220 bus 70%

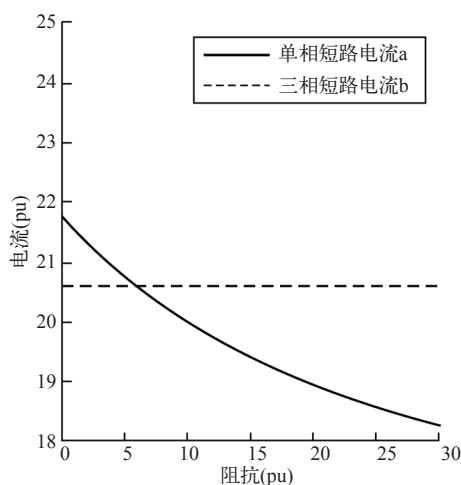


图8 短路点距GEN2-220母线70%

Fig.8 The short circuit point is far from the GEN2-220 bus 70%

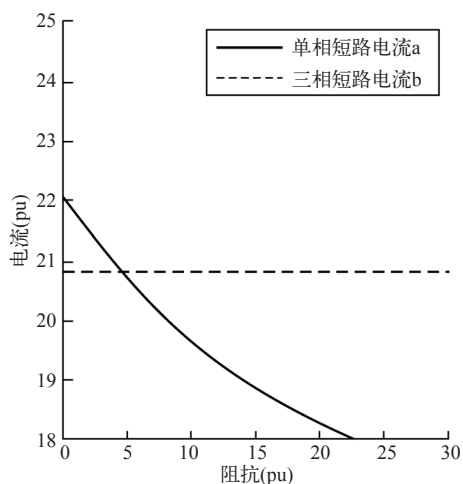


图9 短路点位于GEN2-220母线上

Fig.9 The short circuit point is located on the GEN2-220 bus

电抗值为10 Ω 时,对应的单相短路电流为21.066 (pu),降低了14.77%;当阻抗值为25 Ω 时,对应的单相短路电流为18.661 (pu),降低了24.5%;当阻抗值为30 Ω 时,对应的单相短路电流为18.184 (pu),降低了26.43%,证明了电抗值过大时对限流效果不明显。电抗值选在10~25 Ω 时,限流作用最明显。对比图7和图8可以看出,当短路点距离变压器 T_1 过远时,通过在变压器 T_1 中性点加装小电抗对限制短路电流的效果不那么明显;相反,可以在变压器 T_2 中性点加装小电抗限制短路电流。

4 结束语

为提高500 kV自耦变压器供电可靠性,在中性点加装小电抗器,可有效限制220 kV侧单相短路电流大小,当电抗值选在10~25 Ω 之间时,限流效果最为明显,而且也最为经济。中性点加装小电抗对限制220 kV侧单相短路电流有一定的适用范围,当短路点距离站点过远时,可考虑在距短路点相对更近的站点变压器中性点加装合适阻值的小电抗来限制短路电流。

参考文献

- [1] 朱天游. 500 kV自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18.
ZHU Tianyou. Application of autotransformer neutral grounding by small reactance in 500 kV power system[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 15-18.
- [2] Owen E L. The historical development of neutral grounding practices[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1997, 3(2): 10, 12, 14, 16-18, 20.
- [3] 颜丽娟, 杨淑英, 倪腊琴, 等. 500 kV中性点经小电抗接地自耦变压器后备保护整定计算的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 77-81, 87.
YAN Lijuan, YANG Shuying, NI Laqin, et al. Study on backup protection setting for 500 kV autotransformer with neutral point grounding by small reactance[J]. Power System Protection and

- Control, 2012, 40(2): 77-81, 87.
- [4] 欧阳旭东, 彭发东, 喇元, 等. 500 kV自耦变压器中性点加装小电抗的设计及选型方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 45-48.
OUYANG Xudong, PENG Fadong, LA Yuan, et al. The design and model selection method for installation of low reactance in 500 kV auto-transformers, neutral-point[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 45-48.
- [5] 李晓华, 张波, 傅龙辉, 等. 多个500 kV站点自耦变中性点加装小电抗对零序电量叠加影响的研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1074-1082.
LI Xiaohua, ZHANG Bo, FU Longhui, et al. Influences of adding small reactances to neutral points of autotransformers in multiple 500 kV substations on superposition of zero-sequence electrical quantities[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1074-1082.
- [6] 江林, 王自强, 张庆庆, 等. 500 kV及220 kV自耦变压器对电网单相短路电流的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 108-116.
JIANG Lin, WANG Ziqiang, ZHANG Qingqing, et al. Impact of using 500 kV and 220 kV autotransformers to the single-phase short circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 108-116.
- [7] Chang P, Alimjan Kader, Wang H Y. Study on protection of neutral point earthing capacitance of converter transformer by spark gap[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 56-60.
- [8] 毛雪雁, 宣晓华. 500 kV自耦变压器中性点小电抗接地的研究[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 26-29.
MAO Xueyan, XUAN Xiaohua. 500 kV auto-transformer with neutral point grounded through small reactance[J]. East China Electric Power, 2005, 33(5): 26-29.
- [9] Rosso O A, Blanco S, Yordanova J, et al. Wavelet entropy: a new tool for analysis of short duration brain electrical signals[J]. Journal of Neuroscience Methods, 2001, 105(1): 65-75.
- [10] Lloyd G J, Yip H T, Millar G. Operation, design and testing of generator 100% stator earth fault protection using low frequency injection[C]. International Conference on Developments in Power System Protection, IET, 2008: 92-97.
- [11] 梁纪峰, 刘文颖, 梁才, 等. 500 kV自耦变中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 96-99.
LIANG Jifeng, LIU Wenying, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance on ground short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 96-99.
- [12] Kingrey L J, Painter R D, Locker A S. Applying high-resistance neutral grounding in medium-voltage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1220-1231.
- [13] Burke J, Marshall M. Distribution system neutral grounding[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, IEEE, 2001: 166-170.
- [14] 王磊, 徐丙华. 华东电网500 kV自耦变压器中性点小电抗接地应用的研究[J]. 变压器, 2010, 47(5): 53-56.
WANG Lei, XU Binghua. Application research on small reactance earthing on neutral point of 500 kV auto-transformer in East China Power Grid[J]. Transformer, 2010, 47(5): 53-56.
- [15] 何仰赞, 温增银, 等. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

作者简介



徐瑶台

徐瑶台(1993-),男,硕士研究生,从事电力系统安全与潮流控制研究。

(收稿日期:2018-07-03) **EA**