

# 10 kV 配电网中性点灵活接地方式在单相金属性接地故障下的 ATP 仿真及其研究

张海,徐玉琴,白嘉,高峰

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,河北 保定 071003)

**摘要:** 针对 10 kV 中压配电网,分析了谐振接地补偿的基本原理,通过建立 10 kV 中压配电网接地模型,利用电磁暂态仿真工具软件对线路单相金属性接地故障下中性点谐振接地的补偿过程进行了仿真研究。对文献 [3] 提出的结合谐振接地和电阻接地的中性点灵活接地的过程进行了 ATP 仿真,并指出其存在的问题,在加以改进后重新进行了仿真,通过仿真结果的相互比较,表明了新的接地方式在故障补偿与故障选线方面的优势。

**关键词:** 电力系统; 中压配电网; 谐振接地; 灵活接地; ATP 仿真

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)07-0018-06

## 0 引言

目前在我国 10 kV 中压配电网的中性点接地方式主要有中性点不接地、中性点经低电阻接地和中性点经消弧线圈(包括自动跟踪消弧装置)接地方式,其中中性点经消弧线圈接地也称为谐振接地。近年来我国城市建设发展较快,电力电缆在 10 kV 的城市配电网中大量使用,配电网的对地电容电流迅速增大,单相接地电弧难以自行熄灭。中性点经消弧线圈接地方式尤其是中性点经自动跟踪补偿消弧线圈接地方式因其在处理线路瞬时性、永久性单相接地故障及在人身、设备安全和通信干扰等方面的优势,得到了广泛的推广。然而谐振接地方式补偿了故障电流,同时也给利用故障电流进行故障选线带来了困难,并且依然难以克服故障暂态过电压问题。针对这些问题,人们提出了结合谐振接地与电阻接地优点的中性点灵活接地方式<sup>[2]</sup>。

## 1 中性点谐振接地工作原理与仿真

我国 10 kV 配电网主要采用架空线与电缆混合的网架结构,发生单相接地故障时接地电容电流往往大于 10 A,如果不采用消弧线圈,故障点故障电流会引发间歇性电弧。如果不对电弧进行限制便会危害到电力线路上的其他设备的安全,并极可能会引发多相故障而引起大的事故。

### 1.1 中性点谐振接地系统工作原理

假设线路的对地耦合电容  $C_0 = C_a = C_b = C_c$ ,当线路发生单相故障(C相故障)时,如图 1 所示,A、B

相电压将升高为线电压,A、B 相的对地耦合电容将分别产生两个电容电流并在故障点合成一个数值较大的容性分量为主的故障电流,如图 2 所示。这个电流就是中性点不接地系统产生单相故障闪络电弧的主要因素。当中性点经消弧线圈接地后,消弧线圈可以产生一个反方向的感性电流与容性分量抵消,使故障点只剩下很小的电阻性分量,从而失去起弧的条件,如图 2 所示。一般认为故障残流小于 5 A 就不会产生间歇电弧。对于中压网络电压等级较低的一些系统,残流小于 10 A 时即可熄弧。

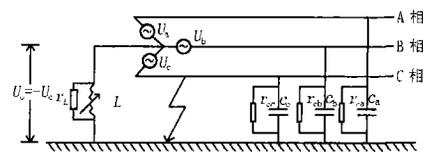


图 1 中压网谐振接地简化模型

Fig 1 Simplified model of medium-voltage resonant earthed neutral system

在图 1 所示的模型中,电网的电容电流为:

$$I_c = 3 C_0 U_\phi \quad (1)$$

其中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为系统频率,  $C_0$  为线路单相零序对地总电容,  $U_\phi$  为系统相电压。

消弧线圈如果要达到最佳补偿,就要  $I_L = I_c$ , 又

因为  $I_L = \frac{U_\phi}{L}$ , 与方程 (1) 联立则有:

$$3 C_0 U_\phi = \frac{U_\phi}{L} \quad (2)$$

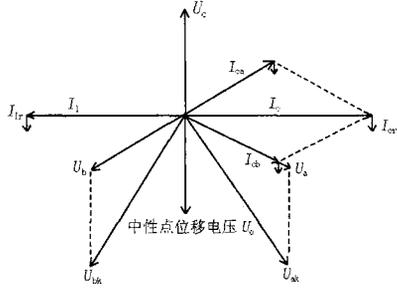
此时消弧线圈对应的电感值为:

$$L = \frac{1}{3^2 C_0} \quad (3)$$

由于线路对地漏电阻和消弧线圈的内阻作用,补偿后故障点会存在故障残流  $I$ :

$$I = \frac{U_\phi}{R} + j C_0 U_\phi + \frac{U_\phi}{j L} = I_R + j(I_C - I_L) \quad (4)$$

其中  $R$  为总的等效电阻。最佳补偿下  $I = I_R$ , 一般情况下  $R$  值较大, 所以残流很小。



$I_L$  为消弧线圈感性补偿电流,  $I_{Lb}$  为消弧线圈阻性电流分量,  $I_C$  为无补偿时接地电流容性分量,  $I_{Cb}$  为无补偿时接地电流阻性分量

图 2 单相金属接地补偿向量图

Fig 2 Vector diagram of bolted single-phase fault compensation

如果线路三相对地耦合电容不相等,  $I_{Cb}$   $I_{Ca}$ , 消弧线圈的感性电流将不与故障电流的容性分量完全在一条直线上, 也就不能完全将容性分量抵消, 故障电流将带着一定的容性分量。如果此容性分量较小, 小于起弧所需的量值, 仍能保证电弧不起; 如果 A、B 相对地耦合电容严重不等, 则仍有起弧的危险。

1.2 谐振接地系统单相金属性接地故障仿真

本文建立的仿真模型系 10 kV 三相对称系统空载模型, 线路采用分布参数模块, 设有 5 条出线, 其中 3 条为电缆线路, 2 条为架空线路, 如图 3 所示。其中 110 kV 高压线路用一个 110 kV 的 3 相电源代替; 为了简化系统变压器用了一个理想的等效变压器, 接线为星-三角接线方式; 用接地变压器来引入人工中性点; 3 条电缆线路长度均为 10 km, 其参数为  $Z_1 = (0.125 + j0.095) / \text{km}$ ,  $Z_0 = (0.97 + j1.590) / \text{km}$ , 正序容纳为  $b_1 = 83.566 \mu\text{s}/\text{km}$ , 零序容纳为  $b_0 = 83.566 \mu\text{s}/\text{km}$ ; 2 条架空线路长度均为 20 km, 其参数为  $Z_1 = (0.270 + j0.351) / \text{km}$ ,  $Z_0 = (0.475 + j1.757) / \text{km}$ , 正序容纳为  $b_1 = 3.267 \mu\text{s}/\text{km}$ , 零序容纳为  $b_0 = 1.100 \mu\text{s}/\text{km}$ 。

试验表明故障现象随故障相电压相位的不同而不同, 而且在故障相电压处于峰值和零值时发生故

障的故障现象最为典型, 其他时刻的故障现象只是在这两者之间的过渡。故本试验只取了故障 A 相电压为 0 和 90 这两个时刻发生故障进行仿真分析。

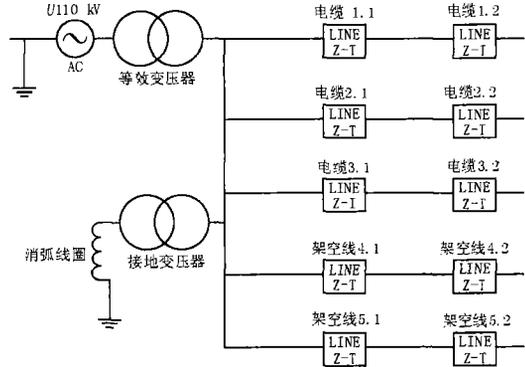


图 3 10 kV 中压谐振接地系统空载仿真模型

Fig 3 No-load model of 10 kV medium-voltage resonant earthed neutral system for simulation

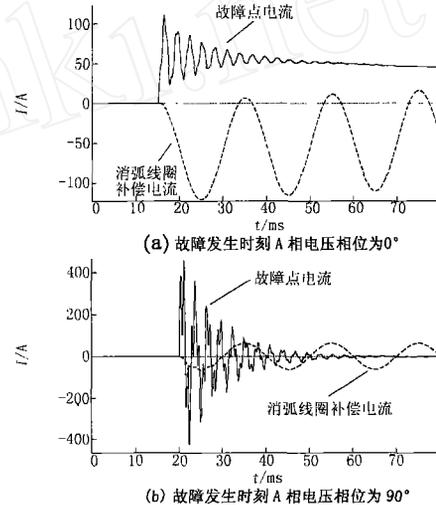


图 4 10 kV 谐振接地系统单相金属性接地故障电流暂态波形图

Fig 4 Transient current waveform of bolted single-phase fault in 10kV medium-voltage resonant earthed neutral system

限于篇幅本文仅对电缆线路 1 进行了故障仿真结果分析, 其他线路故障仿真结果与线路 1 的结果相似。当电缆线路 1 中点处发生金属性 A 相接地故障时, 在全补偿状态下故障点的暂态电流波形如图 4 示, 中性点位移电压暂态波形如图 5 示, 非故障相故障暂态电压波形如图 6 示。

从仿真图中可以看到故障相电压 90 时发生单相金属性接地故障时中性点最大暂态过电压为 14.4 kV, 非故障相电压最大幅值为 21.2 kV, 故障

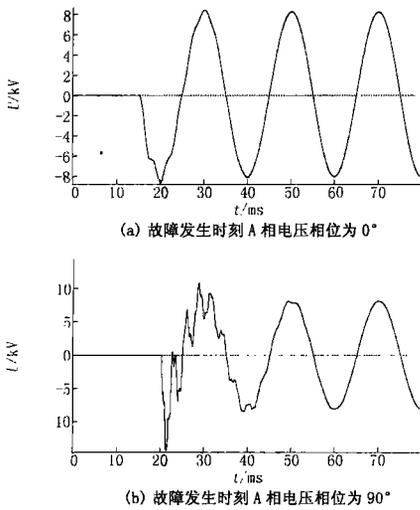


图 5 10 kV 谐振接地系统单相金属性接地故障中性点过电压暂态波形图

Fig 5 Neutral transient over-voltage waveform of bolted single-phase fault in 10kV medium-voltage resonant earthed neutral system

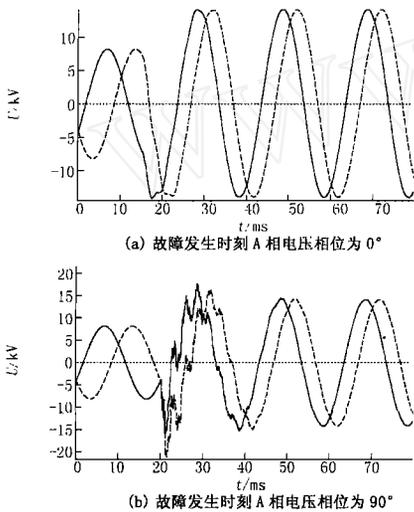


图 6 10 kV 谐振接地系统单相金属性接地故障非故障相电压暂态波形图

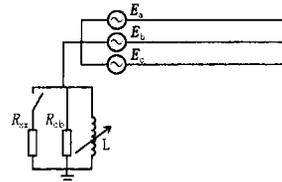
Fig 6 Transient non-fault phases voltage waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage resonant earthed neutral system

点最大暂态过电流幅值为 462 A,暂态过程均较短,大约 1~2 T;当 A 相电压 0 发生单相金属性故障时中性点最大暂态过电压幅值为 8.5 kV,比相电压峰值 8.2 kV 稍大一点,非故障相电压最大幅值为 14.2 kV,电压暂态过程更短,故障点暂态电流最大幅值为 110 A,但暂态过程长。

## 2 中性点灵活接地工作原理与仿真

中性点灵活接地<sup>[3]</sup>是一种新型中性点接地方式。它结合了消弧线圈接地和电阻接地方式,旨在充分发挥经消弧线圈和电阻接地方式的优势并克服其缺点。

### 2.1 中性点灵活接地系统工作原理

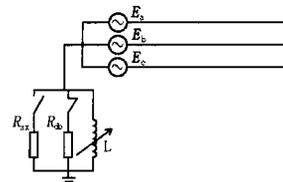


注:L为消弧线圈;R<sub>cb</sub>为中性点长并电阻;R<sub>xx</sub>为选线电阻

图 7 中性点灵活接地系统原理

Fig 7 Neutral flexible grounded system

中性点灵活接地的主要原理是在谐振接地系统中性点上接入并联电阻,在发生单相永久性接地故障后投入此电阻,人为增大故障点零序有功电流从而进行故障选线。文献[3]在文献[2]的基础上进行了改进,在中性点又加入了一个常并联电阻用以抑制中性点故障暂态过电压,充分发挥电阻接地的优点,如图7所示。



注:L为消弧线圈;R<sub>db</sub>为中性点故障短时并联电阻;R<sub>xx</sub>为选线电阻

图 8 改进后的灵活接地系统

Fig 8 Improved neutral flexible grounded system

文献[3]提出中性点长并电阻选取 1 200 Ω,选线电阻投入后总的中性点接地电阻阻值为 600 Ω,即选线电阻也为 1 200 Ω。但笔者认为长并电阻取值 1 200 Ω 值得商榷,作为与电感并联电阻,阻值越小越有利于限制过电压<sup>[7]</sup>,通过仿真也发现 1 200

的长并电阻对限制中性点的暂态过电压的作用并不明显。笔者认为应该将长并高电阻改为故障短时并联中阻,故障后快速退出,如图8所示。故障短时并联电阻的退出原则是在单相接地故障发生后,故障短时并联电阻至少流过一个完整的 0°~180°或 180°~360°的半波之后的电流过零点时退出,这个过程可以通过对用晶闸管构成的电力电子开关控制来实现。这样可以保证电阻的退出不对系统造成

冲击影响,而且其作用的时间在  $T/2 \sim T$  之间可以满足短时释放暂态能量进而限压的需要。

改进后的模型取故障短时并联中阻为  $30 \Omega$ ,  $R_{xx}$  为  $100 \Omega$ 。其中选线电阻  $100 \Omega$  的选取是参照了 20 kV 下中压电网接地电流小于 60 A 时的电磁干扰是不需要调查的规定的<sup>[6]</sup>。

### 2.2 灵活接地系统的单相金属性接地故障仿真

同样对电缆线路 1 的 A 相故障进行试验,按文献 [3] 提出中性点长并电阻选取  $1200 \Omega$ ,选线电阻也为  $1200 \Omega$  进行仿真,在两个故障时刻的全补偿状态下故障点的暂态电流波形如图 9 示,中性点位移电压暂态波形如图 10 示,非故障相故障暂态电压波形如图 11 示。

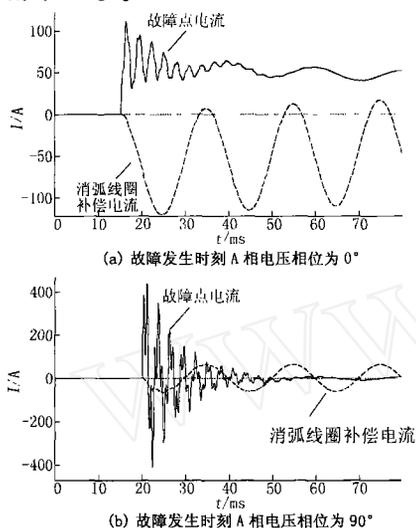


图 9 10 kV 灵活接地系统单相金属性接地故障电流暂态波形图

Fig 9 Transient current waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage neutral flexible earthed system

通过仿真可以看出在文献 [3] 提出的接地方式下发生 A 相金属接地时,在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两个 A 相电压相位下故障电流的暂态峰值几乎没有变化,故障稳态电流大约为 5 A 的阻性电流。两个故障相位下中性点位移过电压峰值分别为 8.4 kV 和 14.37 kV,非故障相过电压最大峰值分别为 14.2 kV 和 20.8 kV,可以看出  $1200 \Omega$  长并电阻在充分发挥暂态过电压的抑制功能上是值得商榷的。

图 12 是中性点灵活接地系统投入选线电阻后的仿真图,文献 [3] 提出故障后 3 s 投入选线电阻用以加大故障点零序电流进行选线,图中故障稳态的有功电流为 5.4 A,而投入选线电阻后零序电流变为 9.9 A,可以区分故障线路。但如果发生经过渡

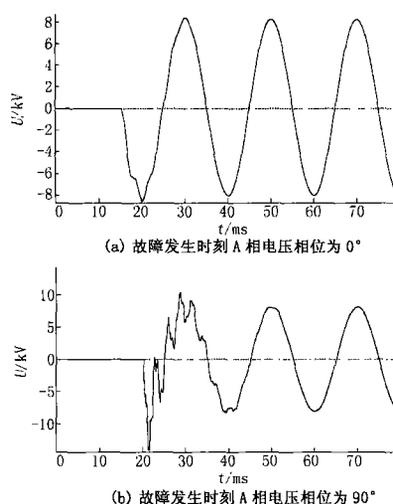


图 10 10 kV 灵活接地系统单相金属性接地故障中性点过电压暂态波形图

Fig 10 Neutral transient over-voltage waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage neutral flexible earthed system

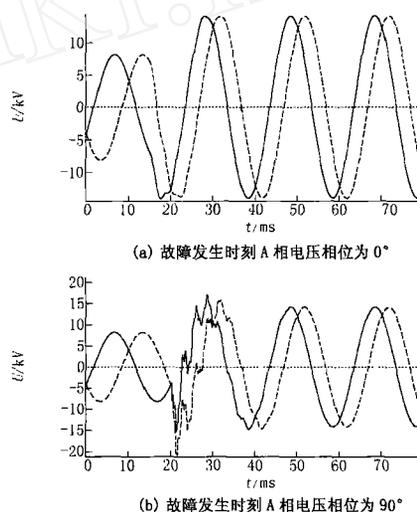


图 11 10 kV 灵活接地系统单相金属性接地故障非故障相电压暂态波形图

Fig 11 Transient non-fault phases voltage waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage neutral flexible earthed system

电阻接地,故障零序电流有明显下降,故障稳态零序电流和故障选线零序电流的数值差会将进一步缩小,将难以区分故障线路。

### 2.3 改进后的灵活接地系统单相金属性接地的故障仿真

按照图 8 的方案进行与原灵活接地相同情况的仿真,仿真结果如图 13、14、15 所示。

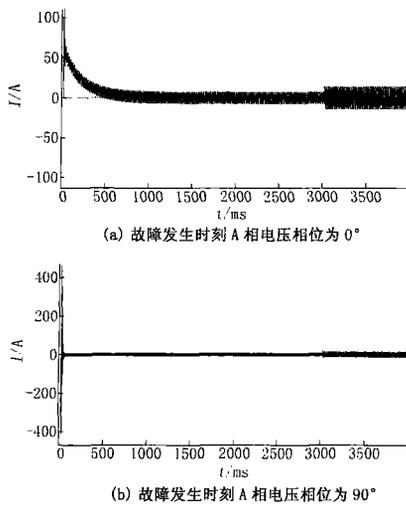


图 12 10 kV 改进后的灵活接地系统单相金属性接地故障选线电流波形图

Fig 12 Fault-line selection current waveform of bolted single-phase fault in 10kV medium-voltage neutral flexible earthed system

由于加入了 30 的故障短时并联电阻,在故障初始  $T/2 \sim 1T$  内故障电流变大,在 A 相电压 0 和 90 时故障的故障电流最大幅值为 306 A 和 601 A,中性点位移电压最大幅值却分别只达到了 8.4 kV 和 9.9 kV,全部限制在 10 kV 之内,而非故障相电压暂态的最大幅值也分别只有 14.2 kV 和 16.8 kV,发挥了电阻接地的优点。又由于快速断开故障短时并联电阻,所以其产生的过电流的时间也尽可能限制到很小的程度了。

图 16 是 3 s 后并上选线电阻的故障电流波形仿真图,图中接入选线电阻后的故障点电流有效值为 57 A,符合小于 60 A 的规定。而且如果是电阻接地,即使故障点电流减小了,也比原来的中性点灵活接地方式的电流要大,选线灵敏度也相对要高。

### 3 结论

1) 通过仿真可以发现在线路发生单相金属接地时,中性点位移电压、接地点故障电流和消弧线圈电流不仅与电压等级、故障地点、线路参数等因素有关,而且还与故障线路发生故障时刻故障相电压的相位有关。故障相电压越接近峰值时发生单相金属性接地故障,系统的暂态过电压越严重,故障点暂态过电流也最厉害;故障相电压越接近零值时发生单相金属性接地故障,中性点暂态过电压越小,暂态过程越不明显,故障点接地电流暂态数值越小但暂态

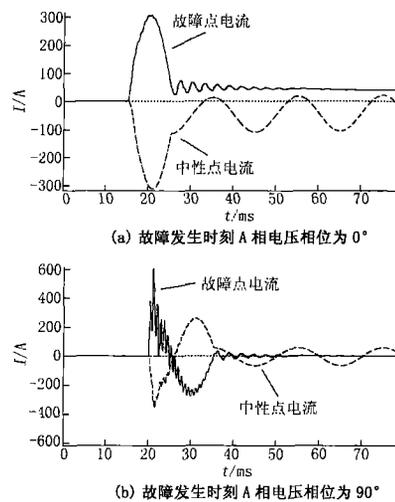


图 13 10 kV 改进后的灵活接地系统单相金属性接地故障电流暂态波形图

Fig 13 Transient current waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage improved neutral flexible earthed system

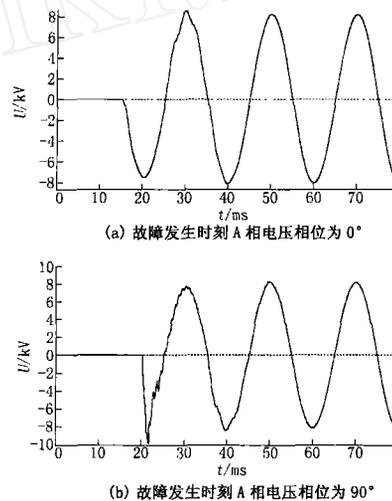


图 14 10 kV 改进后的灵活接地系统单相金属性接地故障中性点过电压暂态波形图

Fig 14 Neutral transient over-voltage waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage improved neutral flexible earthed system

过程越长,甚至可长达数百毫秒,不利于熄弧。

2) 中性点灵活接地将电阻接地和谐振接地结合在一起,发挥电阻接地的限压和增大故障电流的作用,通过控制接入时间和接入的阻值大小实现趋利去弊,再加上谐振接地的补偿作用,灵活接地方式使得补偿、限压、选线三为一体,提高了中压配电网的供电可靠性和线路的设备安全性。

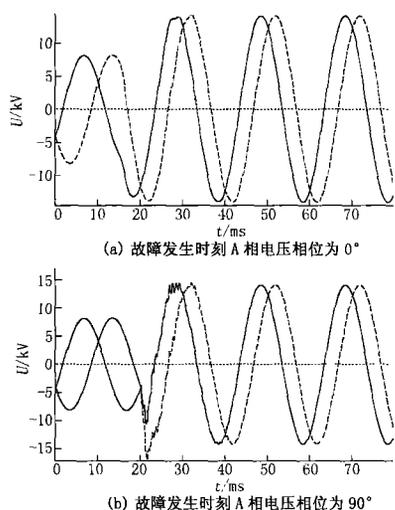


图 15 10 kV 改进后的灵活接地系统单相金属性接地故障非故障相电压暂态波形图

Fig 15 Transient non-fault phases voltage waveform of bolted single-phase fault in 10kV medium-voltage improved neutral flexible earthed system

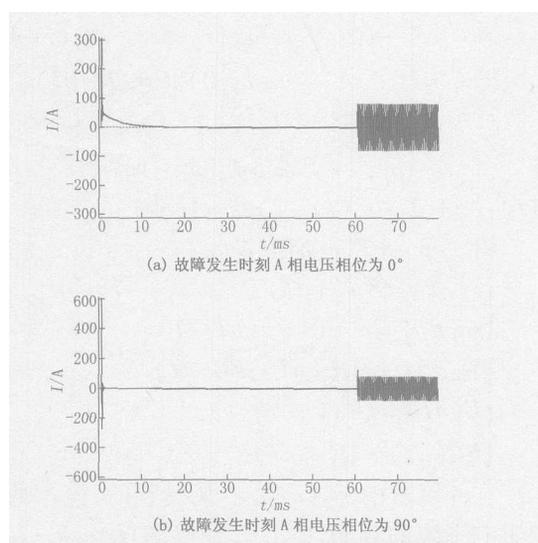


图 16 10 kV 改进后的灵活接地系统单相金属性接地故障选线电流波形图

Fig 16 Fault-line selection current waveform of bolted single-phase fault in 10 kV medium-voltage improved neutral flexible earthed system

3) 使用并联低值电阻来抑制暂态过电压是过电压理论的基本观点之一,具有普遍指导意义。将灵活接地系统的长并联大电阻改为故障短时并联的 30  $\Omega$  中电阻,可以更加有效地抑制系统单相金属性接地故障暂态过电压;并能有效地抑制弧光接地过电压<sup>[8]</sup>; 30  $\Omega$  的电阻从工程技术上来说,其容量更容易满足<sup>[8]</sup>;同时其最快的退出 ( $T/2 \sim 1T$ 内退出)

也尽可能地减小了引入的大电流对系统的破坏。将选线电阻改为 100  $\Omega$  增大了零序电流有利于提高选线的灵敏度,并且接地电流小于 60 A,所引起的电磁干扰处在规定允许的程度。

#### 参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonance Ground of Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 蔡亚萍. 10 kV 配电网中性点灵活接地方式及接地故障检测系统的研究 (硕士学位论文) [D]. 北京:中国电力科学研究院, 2002.  
CAI Ya-ping. The Research on Flexible Neutral Grounding Mode of 10 kV Distribution Network and the Grounding Fault Detection System, Thesis[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2002.
- [3] 伍国兴. 10 kV 配电网中性点灵活接地系统控制器的研制 (硕士学位论文) [D]. 北京:华北电力大学, 2004.  
WU Guo-xing. The Development of the Neutral Flexible Grounded System Controller for 10kV Distribution Networks, Thesis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [4] 苏建设,陈陈. 一种新型消弧补偿装置的暂态性能的仿真研究 [J]. 继电器, 2003, 31 (1): 84-89.  
SU Jian-she, CHEN Chen. Study of Simulation of Transient State Performance of a New Type of Petersen-coil in Distribution Systems [J]. Relay, 2003, 31 (1): 84-89.
- [5] 王贤琴,阮江军,彭迎,等. 中性点接地问题的 MATLAB 仿真与分析 [J]. 广西电力, 2004, (4): 36-39.  
WANG Xian-qin, YUAN Jiang-jun, PENG Ying, et al. MATLAB Simulation and Analysis about Neutral Grounding [J]. Guangxi Electric Power, 2004, (4): 36-39.
- [6] 蔡怡耿. 中压电网中性点接地方式的选择 [J]. 电气 & 智能建筑 (建筑强电册), 2003, (6): 26-29.  
CAI Yi-geng. The Selection of the Medium-voltage Network Neutral Grounding Mode [J]. Building Electrical & Intelligent System, 2003, 6: 26-29.
- [7] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.  
XIE Guang-run. Power System Over-voltage [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [8] 李谦,靳晓东,王晓瑜,等. 配电系统中性点经电阻接地方式限制弧光接地过电压的仿真研究 [J]. 广西电力技术, 1995, (1): 8-15.  
LI Qian, JIN Xiao-dong, WANG Xiao-yu, et al. The Research on Limiting the Arc Light Grounding Over-voltage Simulation in Distribution Network with Impedance Earthed Neutral [J]. Guangxi Electric Power Technique, 1995, (1): 8-15.

收稿日期: 2005-09-12; 修回日期: 2005-10-26

(下转第 42 页 continued on page 42)

- [J]. Sichuan Power Technology, 2002, (2): 3-5.
- [3] 张新华, 舒乃秋, 薛发明. 基于 SCADA 的无功电压自动控制系统 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 81-85.  
ZHANG Xin-hua, SHU Nai-qiu, XUE Fa-ming. Voltage and Reactive Power Automatic Control System Based on SCADA in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11): 81-85.
- [4] 丁晓群, 陈晟, 许杏桃, 等. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用 [J]. 电网技术, 2000, 24 (11): 21-23.  
DING Xiao-qun, CHEN Cheng, XU Xing-tao, et al. Application of Optimization and Centralized Control System for Reactive Power/Voltage in Taizhou Power Network [J]. Power System Technology, 2000, 24 (12): 21-23.
- [5] 郑爱霞, 张建华, 李铭, 等. 地区电网电压无功优化控制系统设计与运行 [J]. 江苏电机工程, 2004, 23 (1): 32-35.  
ZHENG Ai-xia, ZHANG Jian-hua, LI Ming, et al. Exploitation and Application of Voltage-Var Optimizing Control System of Local Power Net [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23 (1): 32-35.
- [6] 徐晓燕, 刘小明. 电压无功功率自动控制器动作判据 [J]. 江苏电机工程, 2001, 20 (4): 41-45.  
XU Xiao-yan, LU Xiao-ming. Operation Criteria of Automatic Voltage/Var Controller [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2001, 20 (4): 41-45.
- [7] 吴强. 区域电网电压无功优化控制系统的开发与应用 [J]. 现代电力, 2003, 20 (3, 4): 54-58.  
WU Qiang. Developing and Application of District Power Network Voltage Reactive Power Optimization Control System [J]. Modern Electric Power, 2003, 20 (3, 4): 54-58.

收稿日期: 2005-07-21; 修回日期: 2005-09-06

作者简介:

姜学宝 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网调度的技术工作; E-mail: xuebaojiang@sina.com

江卫中 (1964-), 男, 高级工程师, 从事电网无功、线损及电压质量的技术管理工作。

### Application and practice of optimization system for voltage and reactive power in Suzhou district power network

JANG Xue-bao, JANG Wei-zhong

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** The status quo of control of voltage and reactive power of substations and construction situation of optimization system for voltage and reactive power in Suzhou district power network are introduced in this paper, and the optimization system based on the whole Suzhou district power network is developed. This paper analyzes its hardware constitution and network security constitution way, then presents mathematics model, arithmetic design, software design flow, and details safety blocking function design. And its practical function and real application effects in Suzhou city power network are illustrated as well in the end.

**Key words:** voltage quality; reactive power optimization; safety blocking; application effect

(上接第 23 页 continued from page 23)

作者简介:

张海 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护的新原理新技术; E-mail: zhwp3000@163.com

徐玉琴 (1964-), 女, 硕士, 教授, 从事电力系统继电保护与控制的的教学研究工作;

白嘉 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事继电保护新原理与新技术方面的研究。

### Research on bolted single-phase ground fault in 10 kV distribution network with flexible ground neutral treatment and its ATP simulation

ZHANG Hai, XU Yu-qin, BA I Jia, GAO Feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The paper analyses the basic theory of the resonant earthed neutral system to the 10 kV medium-voltage network. Using ATP software, the paper establishes a 10 kV distribution system and makes simulation to compensate process of the resonant earthed neutral with single phase to ground fault. After making simulation to the neutral flexible grounded system proposed in reference 3, which takes the advantages of the resonant grounded neutral treatment and the impedance grounded neutral treatment, this paper points out its problems and does simulation after its improvement. The new neutral point treatment shows its superiority in fault compensation and fault-line selection through the comparison of simulation results.

**Key words:** power system; medium-voltage power distribution system; resonant grounding; neutral flexible grounding; ATP simulation