

消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究

刘青, 王增平, 张媛

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 从理论上分析了 STATCOM 对距离保护测量阻抗的影响, STATCOM 的装设使测量阻抗中产生了一个附加阻抗, 会使阻抗继电器出现欠范围拒动和超越动作的行为。建立了包含 STATCOM 的双机保护系统模型, 并对不同故障类型和不同补偿度时距离保护的误动进行了仿真, 结果表明 STATCOM 的补偿度越高, 距离保护发生误动的情况越严重。根据故障时保护安装处电压幅值的大小与故障点的位置远近有关, 提出了故障位置识别的判据及消除距离保护误动的方案, 通过判断故障回路是否包含 STATCOM 而自适应的调整测量阻抗, 若故障回路中包含 STATCOM, 则在原测量阻抗的基础上减去附加阻抗, 再与定值进行比较, 否则将测量阻抗直接与定值进行比较。对各种故障情况进行仿真实验验证, 结果表明所提方法可以有效地消除距离保护的误动, 提高保护的可靠性。

关键词: STATCOM; 距离保护; 附加阻抗; 欠范围拒动; 超越

Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection

LIU Qing, WANG Zeng-ping, ZHANG Yuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper theoretically analyses the impact of the STATCOM on the measured impedance of distance protection. The installation of the STATCOM will produce an additional impedance in the measured impedance. This phenomenon will make the impedance relay under-reaching or over-reaching. A two-generator protect system model with STATCOM is established and the maloperation of distance protection in different fault types and different compensated degree is simulated. Results prove that the higher the compensated degree of STATCOM is, the more serious the effect is. According to that the voltage amplitude of protection at fault is related to the location of fault point, it proposes a criterion of fault point identification and scheme of eliminating the fault action of distance protection. We can judge that whether the fault circuit contains STATCOM, if it contains STATCOM, the actual fault impedance is the original measured impedance minus an additional impedance, and then compare it with definite value; on the contrary, the measured impedance is directly compared with the definite value. Simulations have been made to verify the correctness and the feasibility of this new method. Results prove that the proposed method can effectively eliminate the fault action of distance protection and improve the reliability of the protection.

Key words: STATCOM; distance relay; additional impedance; under reaching; over reaching

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0093-06

0 引言

STATCOM 在电力系统中稳定节点电压、抑制系统振荡、提高静态稳定性和暂态稳定极限等方面具有很大的优点^[1-4]。但是, STATCOM 加入后对系统的参数进行调节, 不可避免地会对继电保护造成影响, 可能使保护失去选择性。文献[5-8]研究了 STATCOM 对距离保护跳闸特性的影响, 结果表明投入 STATCOM 后改变了系统的测量阻抗, 会使距离保护的动作边界受到影响。文献[9-10]则主要对

STATCOM 产生的谐波对距离保护的影响进行了详细的分析与仿真, 但以上文献均没有对 STATCOM 产生的影响提出具体的解决方案。

本文利用 PSCAD 仿真软件建立了含 STATCOM 的双机系统仿真模型。详细分析了由于装设 STATCOM 对距离保护测量阻抗产生的影响, 并对各种故障类型以及 STATCOM 不同补偿度时保护的欠范围拒动和超越动作进行了仿真实验验证。最后根据故障时保护安装处的故障相电压信息判断故障

回路是否包含 STATCOM，从而自适应地调整测量阻抗值，消除 STATCOM 对测量阻抗的影响。仿真结果证明新方案可以有效地消除 STATCOM 对测量阻抗的影响，提高了距离保护动作的可靠性。

1 含 STATCOM 的仿真系统模型

本文采用 PSCAD 仿真软件，搭建了如图 1 所示的含 STATCOM 的 220 kV 双电源仿真系统。模型中通过改变 STATCOM 安装地点距离母线 m 侧长度 l_1 的参数，可以实现 STATCOM 的补偿位置分别在线路首端、中间和末端各种情况的仿真分析。

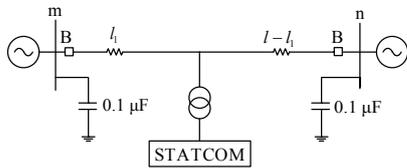


图 1 包含 STATCOM 的双机系统

Fig.1 Two-generator system including STATCOM

其中，线路 l 长 300 km。线路参数为：

$$Z_1 = 0.035744 + j0.507762 \ \Omega/\text{km},$$

$$C_1 = 0.002429 \ \mu\text{F}/\text{km};$$

$$Z_0 = 0.363152 + j1.326473 \ \Omega/\text{km},$$

$$C_0 = 0.001725 \ \mu\text{F}/\text{km}。$$

系统两端的功角相差 20° ，STATCOM 的容量为 100 MVA，连接变压器的漏抗为 0.1 pu。线路两侧距离保护阻抗继电器采用方向圆特性。

2 STATCOM 对距离保护的影响分析与仿真

由于 STATCOM 安装在线路中点会提高系统的暂态稳定性，并且研究分析表明，在两机系统中，使用中点补偿是最好的选择。但是在工程中，为了维护的方便以及其他的理由，通常都将 STATCOM 安装在变电站，即线路的首端或者末端，因此，本文分别对 STATCOM 安装在线路首端、中间和末端三种情况进行详细分析。

2.1 保护安装处的测量阻抗分析

2.1.1 STATCOM 安装在线路中间

设 STATCOM 安装在线路中点。分别对故障发生在 STATCOM 之前和之后时 M 侧保护安装处的测量阻抗进行分析。

a) 故障发生在 STATCOM 之前

在 STATCOM 之前发生故障时的等效图如图 2 所示。图中 m 表示从保护安装处到故障点距离占线路全长的百分比； I_M 为 M 侧保护测量处的电流； I_N

为 N 侧保护测量处的电流； I_{st} 为并联 STATCOM 处的电流； I_f 为过渡电阻处的电流； R_f 为过渡电阻； Z_L 为线路阻抗。

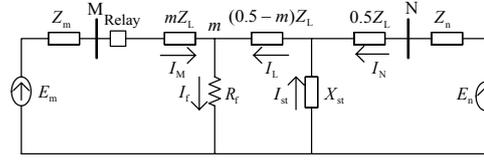


图 2 故障点在 STATCOM 之前的网络等效图

Fig.2 Equivalent network of fault before STATCOM

由等效图可知，M 侧保护安装处的电压为：

$$V_M = mZ_L I_M + I_f R_f \quad (1)$$

则 M 侧保护安装处的测量阻抗为：

$$Z_{M\text{relay}} = \frac{V_M}{I_M} = mZ_L + R_f \left(\frac{I_f}{I_M} \right) \quad (2)$$

由式 (2) 可知，保护安装处的测量阻抗受过渡电阻的影响，且 STATCOM 的投入也会使得由过渡电阻产生的附加阻抗增大。这是由于 $I_f = I_M + I_N + I_{st}$ ，当 STATCOM 的补偿度增大时，附加阻抗也会增大，从而导致测量阻抗的误差会更大。

b) 故障发生在 STATCOM 之后

故障发生在 STATCOM 之后的等效图如图 3 所示。

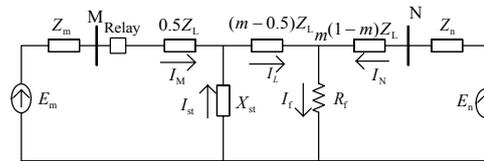


图 3 故障点在 STATCOM 之后的网络等效图

Fig.3 Equivalent network of fault after STATCOM

由等效图可知，M 侧保护安装处的电压为：

$$V_M = 0.5Z_L I_M + (m-0.5)Z_L I_{st} + I_f R_f \quad (3)$$

根据电流之间的关系，有：

$$\begin{cases} I_L = I_M + I_{st} \\ I_f = I_M + I_N + I_{st} \end{cases} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 整理得：

$$V_M = mZ_L I_M + (m-0.5)Z_L I_{st} + I_f R_f \quad (5)$$

则阻抗继电器的测量阻抗为

$$Z_{\text{relay}} = \frac{V_M}{I_M} = mZ_L + (m-0.5)Z_L \left(\frac{I_{st}}{I_M} \right) + R_f \left(\frac{I_f}{I_M} \right) \quad (6)$$

与式 (2) 比较可知, 式 (6) 除了由过渡电阻产生的附加阻抗外, 还包含由并联 STATCOM 产生的附加阻抗。该附加阻抗表现为:

$$Z_{\text{error}} = (m - 0.5) Z_L \left(\frac{I_{\text{st}}}{I_M} \right) \quad (7)$$

由于 STATCOM 产生的附加阻抗与故障位置 m 和 STATCOM 的补偿度 (I_{st} / I_M) 有关系。若 STATCOM 向系统注入电流, 则会使附加阻抗变大从而导致测量阻抗变大, 引起距离保护欠范围拒动; 若 STATCOM 向系统吸收无功电流, 则会使测量阻抗减小, 可能引起距离保护的超越。

2.1.2 STATCOM 安装在线路首端

当 STATCOM 安装在线路首端时, 等效图如图 4 所示。

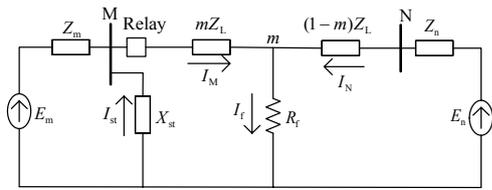


图 4 STATCOM 安装在线路首端时的网络等效图

Fig.4 Equivalent network of STATCOM ahead of the line

此时保护安装处的测量电流为 $I_M + I_{\text{st}}$, 测量电压为:

$$V_M = mZ_L (I_M + I_{\text{st}}) + R_f I_f \quad (8)$$

则阻抗继电器的测量阻抗为

$$Z_{\text{relay}} = \frac{V_M}{I_M} = mZ_L + mZ_L \left(\frac{I_{\text{st}}}{I_M} \right) + R_f \left(\frac{I_f}{I_M} \right) \quad (9)$$

由分析可知, STATCOM 安装在线路首端时, 并联 STATCOM 会产生附加阻抗从而导致测量阻抗发生变化, 可能引起距离保护的拒动或超越。

2.1.3 STATCOM 安装在线路末端

若 STATCOM 安装在线路末端, 经分析可知, 区内线路故障时由于 STATCOM 不包含在故障回路中, 则 M 侧保护的测量阻抗不受 STATCOM 的影响。而在区外相邻线路出口附近发生故障且 STATCOM 吸收无功电流时, 由于测量阻抗减小从而使保护产生超越误动。

2.2 STATCOM 对距离保护影响仿真分析

2.2.1 欠范围拒动

以 M 侧距离保护为例进行仿真。STATCOM 向

系统发出无功。故障性质为永久性故障。距离保护 I 段的保护范围为 85%。线路 80% 处发生各种故障时阻抗继电器 I 段的动作情况仿真结果如图 5 所示, 不同补偿度的仿真情况如表 1 所示。

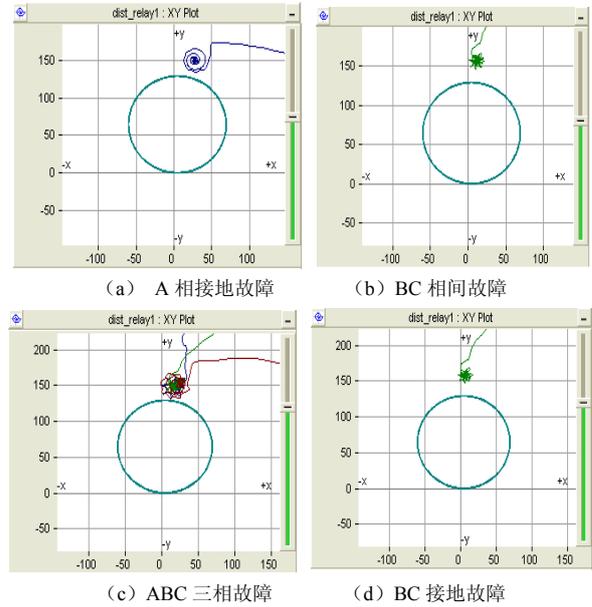


图 5 各种故障类型的欠范围动作情况

Fig.5 Under-reaching actions of different fault types

表 1 不同补偿度下各种故障类型的保护动作情况

Tab.1 Relay operation of various types for differet compensated

故障位置	故障类型	补偿度		
		20%	50%	100%
75%	Ka	I	I	I
	Kbc	I	I	X
	Kabc	I	I	I
	Kbcg	I	I	X
80%	Ka	I	X	X
	Kbc	I	X	X
	Kabc	I	I	X
	Kbcg	I	X	X
85%	Ka	X	X	X
	Kbc	X	X	X
	Kabc	I	X	X
	Kbcg	X	X	X

其中, I 代表距离保护 I 段动作, X 代表距离保护 I 段不动作。由表 1 可知, 补偿度越高, 在距离保护范围末端发生欠范围拒动的情况越严重。

2.2.2 超越误动

仿真条件: STATCOM 向系统吸收无功。故障

性质为永久性故障。距离保护 I 段的保护范围为 85%。线路 105% 处发生各种故障时阻抗继电器 I 段的动作情况的仿真结果如图 6 所示。

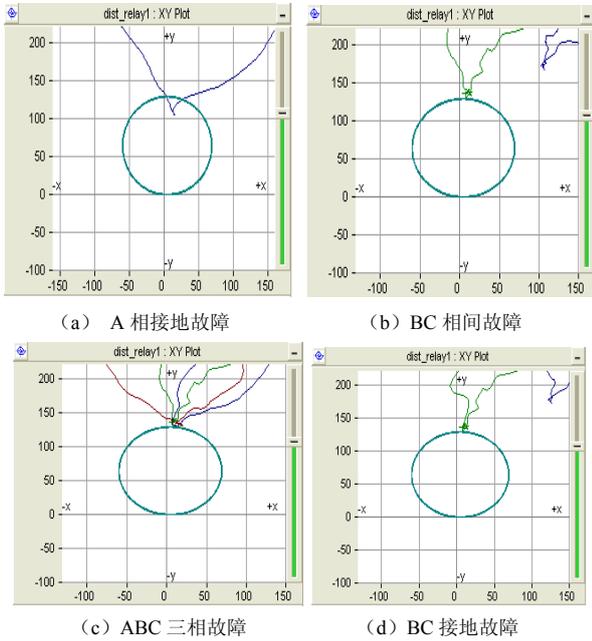


图 6 各种故障类型的超越误动作情况

Fig.6 Over-reaching actions of different fault types

由仿真结果图 5 和图 6 可知，由于可控并联装置 STATCOM 的投入，使距离保护在保护范围末端短路且 STATCOM 向系统发出无功时出现了欠范围拒动的现象，而在区外故障且 STATCOM 向系统吸收无功时出现了超越误动作。

3 消除距离保护误动的方法

根据以上分析可知，当故障回路中包含 STATCOM 时，STATCOM 产生的附加阻抗会使测量阻抗发生变化从而导致距离保护发生拒动或超越。因此，本文提出自适应调整测量阻抗的方法以消除 STATCOM 附加阻抗产生的影响。

3.1 保护方案

首先判断故障回路中是否包含 STATCOM，若故障回路中不包括 STATCOM，即故障发生在 STATCOM 之前，测量阻抗为 $Z_{relay} = Z_m$ ；若故障回路中包含 STATCOM，即故障发生在 STATCOM 之后，测量阻抗则减去附加阻抗 Z_{error} ， $Z_{relay} = Z_m - Z_{error}$ ，然后再与定值进行比较。这样，定值仍按原有的整定原则整定即可。距离保护新方案流程图如图 7 所示。

方案中故障回路是否包含 STATCOM 的判断可以根据电压值的计算来实现。由于 STATCOM 的安

装点为已知，当线路发生故障时，保护安装处的测量电压与故障点的位置有关，故障点离保护安装处越远，电压值越大。因此，可以通过比较故障时 STATCOM 安装点电压与保护测量电压实现故障位置的判断。判别条件为：

$$U_{\phi relay} < U_{\phi STATCOM} \quad (10)$$

其中： $U_{\phi relay}$ 为故障时保护安装处的测量电压， $U_{\phi STATCOM}$ 为 STATCOM 装设点发生各种故障类型时的故障电压。当测量电压幅值小于 STATCOM 的装设点故障产生的电压时，判断为故障回路不包含 STATCOM，反之，判断为故障回路包含 STATCOM。

实际运行中，由于 STATCOM 的工作模式及其补偿度对故障电压会有影响，分别对投入 STATCOM 后且 STATCOM 发出无功时，线路在不同故障位置时保护安装处的故障相电压基波值进行仿真，结果如表 2 所示。不同补偿度时的电压仿真结果见表 3。

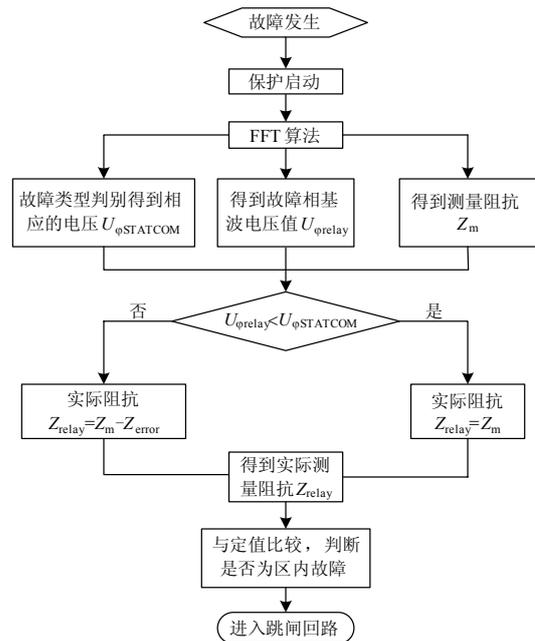


图 7 距离保护的改进方案流程图

Fig.7 Flow chart of improved scheme of distance protection

由表 2 可以看出，当不同故障位置发生不同故障类型时，故障点离保护安装处越远，保护安装处的测量电压越高。表 3 结果表明，补偿度的大小对电压值的影响很小，不同补偿度表现出的电压值相近，说明判别条件不受 STATCOM 补偿度的影响。

由于不同故障类型时电压值不同，应根据不同故障类型设置不同的阈值。本文的取值分别为三相

短路时 80 kV, 两相短路时 86 kV, 单相接地故障时为 96 kV, 两相接地短路时 100 kV。

表 2 并补线路不同故障位置下的基波电压值

Tab.2 Voltage of different fault location

故障位置/ %	故障类型			
	A 相接地/ kV	BC 两相短路/ kV	三相短路/ kV	BC 接地/ kV
25	73.65	60.72	55.15	84.09
45	92.28	79.19	74.27	94.05
50	95.45	84.41	78.09	98.23
55	98.79	91.47	82.58	104.41
75	108.82	105.54	96.58	115.10
100	113.73	108.08	105.74	116.31

表 3 不同补偿度时的基波电压值

Tab.3 Voltage of different compensated degree

补偿度	故障位置					
	25%	45%	50%	55%	75%	100%
5%	71.72	89.91	93.00	96.52	103.17	106.71
30%	72.68	91.12	94.27	97.14	105.82	110.07
50%	73.01	91.48	94.64	97.65	106.75	111.19
100%	73.65	92.28	95.45	98.79	108.82	113.73

考虑实际运行过程中存在测量计算误差和过渡电阻的情况, 当在保护范围末端故障时, 线路残压都较高, 判据均能够做出正确判断。即使在 STATCOM 的安装点(线路中点)附近故障时, 由于测量计算误差电压判据做出错误判断, 但是由于故障点在中点附近, 附加阻抗较小, 距离保护不受影响, 仍能够正确动作。当故障点存在过渡电阻且过渡电阻较大时, 故障残压较高, 此时电压判据有可能会判断为故障回路包含 STATCOM, 从而减去附加阻抗。这样, 就会抵消一部分由过渡电阻产生的误差, 对保护是有利的。

3.2 方案的仿真验证

按照距离保护的改进方案, 重新仿真线路中点投入 STATCOM 后, 故障位于线路 80%处和线路 105%处发生各种故障类型时保护的動作情况。仿真结果如图 8 和图 9 所示。距离保护 I 段的保护范围仍为线路长度的 85%。另外对过渡电阻值很大时的保护動作情况进行了仿真, 仿真结果如图 10 所示。

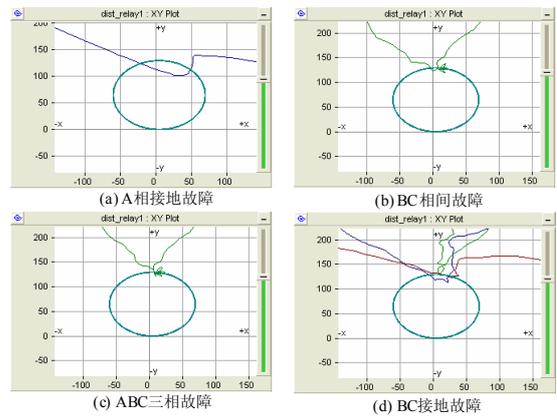


图 8 线路 80%处故障时防止欠范围拒动的情况

Fig.8 Relay action to avoid under-reaching at 80% fault location

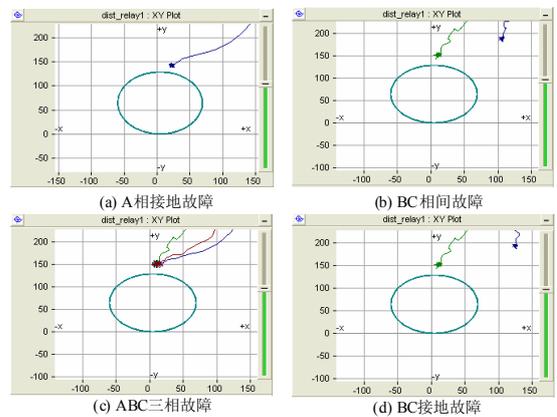


图 9 线路 105%处故障时防止超越动作的情况

Fig.9 Relay action to avoid over-reaching at 105% fault location

图 8 和图 9 的仿真结果表明, 当测量阻抗减去由 STATCOM 产生的附加阻抗的干扰后, 各种情况下距离保护能够正确动作, 消除了欠范围拒动和超越动作的错误动作行为。图 10 (a) 表明当区内故障过渡电阻很大时造成保护拒动, 而通过改进方案减去附加阻抗后, 如图 10 (b) 所示保护可以正确动作。

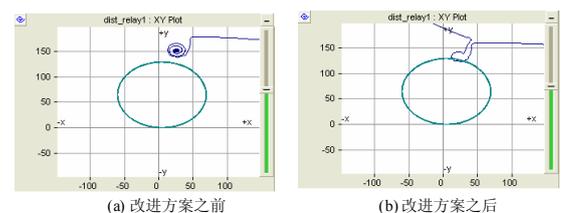


图 10 过渡电阻很大时距离保护动作的情况

Fig.10 Relay action to avoid under-reaching with fault resistance

以上仿真分析表明, 本文利用电压判据判断故障回路中是否包含 STATCOM, 从而减去由于 STATCOM 注入电流产生的附加阻抗, 有效地消除了距离保护的欠范围拒动和超越误动, 提高了保护的可靠性。

4 结论

通过进行 STATCOM 对距离保护影响的理论分析和 PSCAD 建模, 对含 STATCOM 的并补线路各种故障情况进行仿真, 仿真结果证明, 当故障回路包含 STATCOM 时, 由于加入了可控并补装置 STATCOM, 会使距离保护的测量阻抗因产生附加阻抗而改变。当 STATCOM 向系统发出无功电流时, 测量阻抗增大, 使保护范围缩小, 阻抗继电器会出现欠范围拒动的情况; 当 STATCOM 向系统吸收无功电流时, 测量阻抗减小, 使保护范围增大, 阻抗继电器会出现超越动作的情况。根据保护安装处基波电压幅值的大小与故障点的位置远近有关, 提出了故障位置识别的判据, 判断故障位置在 STATCOM 之后, 即故障回路包含 STATCOM, 则在原测量阻抗的基础上减去附加阻抗后, 再与定值进行比较, 有效消除了保护的误动。利用新方法对各种故障情况进行仿真, 验证了该方法的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 1-5.
WANG Zhong-hong, SHEN Fei, WU Tie-zheng. FACTS applications in China and its developing trends[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (23): 1-5.
- [2] 林孔兴, 李菊根, 李向荣, 等. STATCOM 应用于 2010 年华中电网的初步研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 10-13.
LIN Kong-xing, LI Ju-gen, LI Xiang-rong, et al. Preliminary study on the application of STATCOM to central China power system in 2010[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 10-13.
- [3] 李向荣, 罗承廉, 李勇, 等. STATCOM 应用于 2000 年华中电网的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (23): 6-9.
LI Xiang-rong, LUO Cheng-lian, LI Yong, et al. Simulation of the STATCOM in central China power system in 2000[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (23): 6-9.
- [4] 陆超, 崔文进, 李红军, 等. 京沪穗电网暂态电压稳定问题与 STATCOM 应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (11): 9-12.
LU Chao, CUI Wen-jin, LI Hong-Jun, et al. Problems and solutions of transient voltage stability in load centers of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11): 9-12.
- [5] Dash P K, et al. Adaptive relay setting for flexible AC transmission system(FACTS)[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(6): 324-331.
- [6] Sidhu T S, Varma R K, Gangadharan P K, et al. Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 1837-1845.
- [7] Kazem A, Jamal S, Shateri H. Effects of STATCOM on distance relay tripping characteristic [C]. //2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition Asia and Pacific. Dalian(China): 2005: 1-6.
- [8] Albasri F A, Sidhu T S, Varma R K. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2116-2125.
- [9] 吴振杰. STATCOM 对距离保护影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
WU Zhen-jie. Research on distance relay in the presence of STATCOM[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [10] 张媛, 刘青, 王增平. STATCOM 谐波分析及其对输电线路保护的影响[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(5): 27-31.
ZHANG Yuan, LIU Qing, WANG Zeng-ping. Analysis of harmonics and effect with STATCOM in the transmission line protection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36 (5): 27-31.

收稿日期: 2009-12-30; 修回日期: 2010-07-20

作者简介:

刘青(1974-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事微机保护、FACTS 元件协调控制及其对保护影响方面的研究;
E-mail: liuqing0816@yahoo.com.cn

王增平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究;

张媛(1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事 STATCOM 对继电保护的影响方面的研究。