

超导磁储能装置对输电线路多边形特性距离保护的影响分析

王展¹, 吴威¹, 张文嘉¹, 杨军²

(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 超导磁储能 (SMES) 装置响应速度快, 能够对有功、无功进行独立控制, 在电力系统中将得到越来越广泛的应用。SMES 并入系统后的充放电过程会与电网双向交换功率, 可能会对输电线路的继电保护产生影响, 造成保护装置的不正确动作。在建立 SMES 电磁暂态仿真模型的基础上, 在 PSCAD 环境下研究了含 SMES 的单机无穷大系统 (SMIB) 输电线路多边形距离保护的动作特性, 针对不同短路故障类型和 SMES 的不同安装位置分析了多边形距离保护的动作结果。仿真结果表明, SMES 并入电网后多边形距离保护的测量阻抗发生了变化, 在某些情况下会对保护的動作结果产生影响。最后提出了一个保护动作特性曲线的改进方案, 并通过仿真试验验证了其可行性。

关键词: 超导磁储能; 多边形特性距离保护; PSCAD 仿真

Effects analysis of SMES device on polygon distance relay of transmission line

WANG Zhan¹, WU Wei¹, ZHANG Wen-jia¹, YANG Jun²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Superconductor magnetic energy storage (SMES) system has rapid response and controls active and reactive power independently, so it is applied more broadly. But its charge or discharge processes will exchange power with the power system and may affect relay protection of transmission line. This paper builds an electromagnetic transient simulation model for SMES and studies characteristics of the polygon distance relay of transmission line in one-machine-infinite-bus (OMIB) system with SMES in PSCAD. The simulation on the polygon distance relay is conducted under different faults and at different installation sites of SMES. Results show that when the SMES is connected to the power grid, the measured impedance is changed and the relay action is affected. At last, a scheme for improving the relay protection characteristic curve is proposed and proved to be feasible by simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50707021).

Key words: superconductor magnetic energy storage (SMES); polygon distance relay; PSCAD simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0008-06

0 引言

近年来, 基于电力电子技术的 FACTS 技术得到了大力发展, FACTS 元件的接入可以提高电力系统运行的灵活性、可靠性及运行稳定性。超导磁储能装置 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 是将超导磁体的无损高效储能特性与电力电子的快速电能转换技术相结合的一种新型功率调节和能量转换装置, 也是目前较为实用的一种 FACTS 装置, 在提高电力系统的安全稳定运行方面有着独特的优势。当 SMES 接入系统后, 其动作过程会使

保护装置的测量电压和电流值发生变化, 可能影响距离保护的動作特性, 而国内外关于 SMES 接入系统对当前输电线路距离保护可能产生影响的研究还处于起步阶段。因此, 研究 SMES 装置对传统继电保护如距离保护的影响至关重要^[1-8]。

本文利用 PSCAD 仿真软件建立了 SMES 的电磁暂态模型, 对接入 SMES 后输电线路多边形特性距离保护的動作特性进行了研究, 分析了输电线路多边形特性距离保护在 SMES 装置动作时的适应性问题, 并提出了相应的保护误动作解决方案。

1 SMES 仿真模型

SMES 装置由图 1 所示的几个部分组成, 超导

磁体以直流方式进行储能, 通过变流器实现与工频交流电网的电能交换, 从而参与电网的功率调节。模型采用电压外环和电流内环的双闭环串级控制结构对超导磁体进行直接电流控制^[9]。

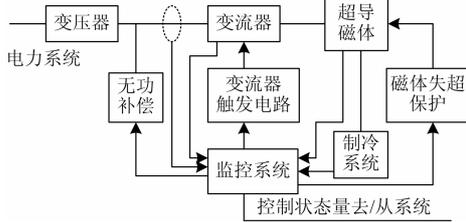


图 1 SMES 装置结构框图

Fig. 1 Block diagram of SMES

SMES 的动作过程即利用超导线圈进行电能的充放, 其并联接入系统, 相当于一个电流源, 通过式(1)可对其输入输出的有功功率、无功功率进行解耦控制。

$$\begin{cases} P_{sm} = \frac{3}{2} E_s I_{sm} \cos\alpha = \frac{3\sqrt{3}}{4} M E_s I_{sm} \cos\alpha \\ Q_{sm} = \frac{3}{2} E_s I_{sm} \sin\alpha = \frac{3\sqrt{3}}{4} M E_s I_{sm} \sin\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 、 I_{sm} 分别表示 SMES 接入点处变流器基波电压和基波电流的幅值; 内环控制信号 M 为调制比; α 为调制正弦信号相位角, 表达式为

$$\begin{cases} \alpha = f(P_r, Q_r) = \tan^{-1}(Q_r/P_r) \\ M = g(P_r, Q_r) = 4\sqrt{P_r^2 + Q_r^2} / (3\sqrt{3}E_s I_{sm}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_r 、 Q_r 分别为外环控制所输入的有功、无功定值。用一阶惯性环节表示 M 、 α 的控制, 可以得到 SMES 的一阶模型, 对电力系统动态过程进行计算。

2 距离保护模型

在我国电力系统中, 多边形特性的距离保护得到了很广泛的应用, 因此本文以多边形动作特性为例进行研究。测量阻抗以及由多边形特性得到的相应动作方程为

$$\begin{cases} -90^\circ - \alpha_1 \leq \arg \frac{Z_m - R_{set}}{-R_{set}} \leq 90^\circ - \alpha_1 \\ -90^\circ - \alpha_2 \leq \arg \frac{Z_m - jX_{set}}{-jX_{set}} \leq 90^\circ - \alpha_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Z_m = \frac{U_\phi}{I_\phi + k \times 3I_0} \\ Z_m = \frac{U_{\phi\phi}}{I_{\phi\phi}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_{set} 、 X_{set} 分别为整定电阻、电抗; α_1 、 α_2 、一般为 15° 。式(4)为接地保护和相间保护的测量阻抗。 U_ϕ 、 I_ϕ 分别为单相电压、单相电流; $U_{\phi\phi}$ 、 $I_{\phi\phi}$ 分别为相间电压、电流; I_0 为零序电流; k 为零序电流补偿系数。

3 含 SMES 的距离保护特性分析

在 PSCAD/EMTDC 环境下建立的一个单机无穷大系统模型如图 2 所示, SMES 系统通过一个变压器并联于输电线路, 线路出口装设有多边形特性距离保护。实际电力系统中 SMES 装置一般安装在输电线路出口或者线路中点处, 因此本文主要讨论这两种情况。本文针对电流源型变流器展开讨论^[7-9]。SMES 模型通过跟踪由外环控制所输入的有功和无功功率给定参考有功、无功值, 得到内环控制参数, 即移相角和调制比^[10-15]。

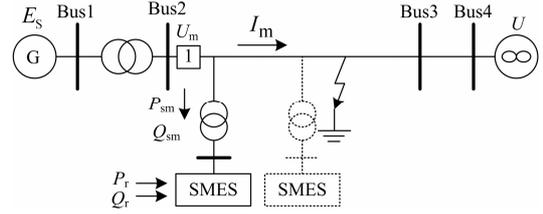


图 2 基于 SMES 的单机无穷大系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of SMIB with SMES

1) SMES 装在线路出口

SMES 在线路出口处, 三相接地故障发生时的等效电路如图 3 所示, SMES 用电流源 I_{sm} 表示。

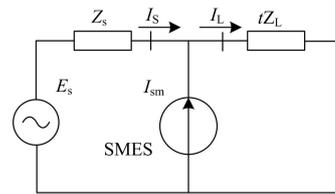


图 3 SMES 装在线路出口处时的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of SMES at the outlet line

U_m 、 I_m 、 Z_m 分别为保护安装处的测量电压、电流、阻抗, t 是故障点到保护处的长度占线路全长的比例, 可得等式如下。

$$\dot{U}_m = tZ_L \dot{I}_L \quad (5)$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}_s \quad (6)$$

$$\dot{I}_L = \dot{I}_s + \dot{I}_{sm} \quad (7)$$

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = tZ_L + \frac{\dot{I}_{sm}}{\dot{I}_s} tZ_L \quad (8)$$

对比线路未装设 SMES 时的测量阻抗值为 tZ_L , 可以看出装 SMES 的线路测量阻抗产生了偏移。偏

移增量为 $(I_{sm}/I_s)tZ_L$ ，此偏移与表示线路位置的参数 t 和 SMES 参数 I_{sm} 成正比例关系，可能使线路距离保护误动作。

2) SMES 装在线路中点

当 SMES 装在线路中点，三相接地短路发生在保护安装处与 SMES 之间，即 $t < 50\%$ 时，等效电路如图 4。保护安装处的测量阻抗为 $Z_m = tZ_L$ 。故障环路电路结构未发生变化，距离保护不受影响。

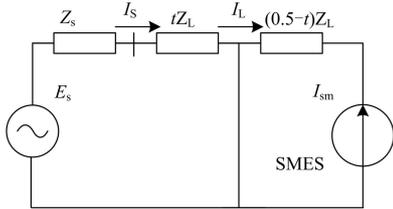


图 4 SMES 在线路中点(故障点在 50%线路前)的等效电路
Fig. 4 Equivalent circuit of SMES at mid-point out of fault loop

当 SMES 在线路中点，三相接地短路发生在 SMES 与对侧系统之间，即 $t > 50\%$ 时，等效电路如图 5 所示，同样可得计算等式(9)~式(12)。

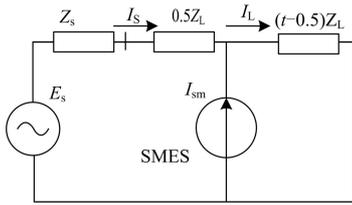


图 5 SMES 在线路中点(故障点在 50%线路后)的等效电路
Fig. 5 Equivalent circuit of SMES at mid-point in fault loop

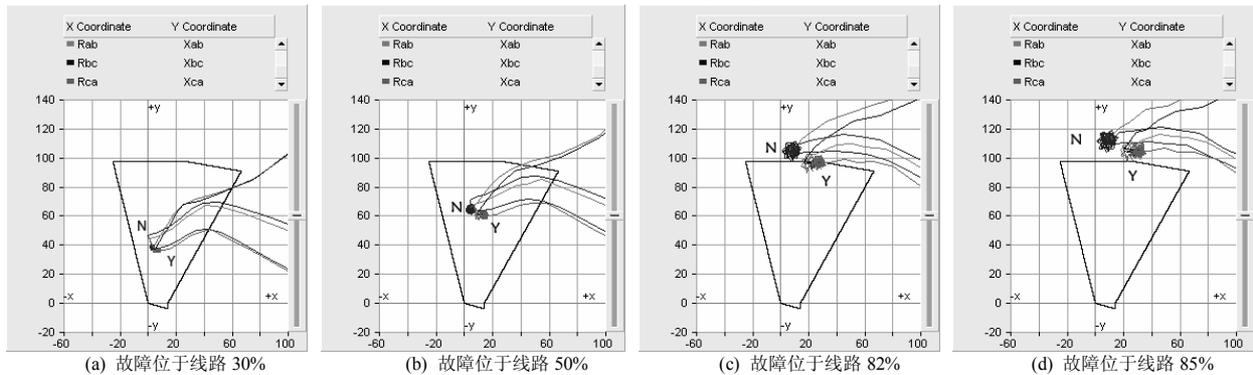


图 6 SMES 位于线路出口时保护的動作特性曲线和测量阻抗曲线

Fig. 6 Curves of measured impedance and tripping characteristic when SMES is at outlet line

从图 6 中可以看出，装设 SMES 后，保护安装处的测量阻抗会发生变化，且测量阻抗的偏移与 t 成正比，同图 4 中所示情况。当三相接地短路位于线路 30%、50% 处，即在保护的動作区内，由图 6(a)、图 6(b) 可看出，测量阻抗的曲线均进入動作区，保护正确動作。当短路位于线路 82% 处，即在保护动

$$\dot{U}_m = 0.5Z_L \dot{I}_s + (t - 0.5)Z_L \dot{I}_L \quad (9)$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}_s \quad (10)$$

$$\dot{I}_L = \dot{I}_s + \dot{I}_{sm} \quad (11)$$

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = tZ_L + \frac{\dot{I}_{sm}}{\dot{I}_s}(t - 0.5)Z_L \quad (12)$$

其中，测量阻抗的偏移为 $(I_{sm}/I_s)(t - 0.5)Z_L$ ，可能引发距离保护的误动作。

4 仿真验证

4.1 仿真实例

在图 2 的仿真模型中，输电线路： $L_{MN} = 30 \text{ km}$ ， $L_{NH} = 4 \text{ km}$ ， $r_1 = 0.013 \Omega/\text{km}$ ， $x_1 = 0.5 \Omega/\text{km}$ 。超导线圈参数为： $L_d = 7.8 \text{ H}$ ，起磁电流 $I_{dc} = 4.0 \text{ kA}$ ，起磁功率 $P_h = 25 \text{ MW}$ 。多边形距离保护的 I 段整定阻抗取： $Z_{set}^I = (12.7 + j105.85) \Omega$ ，保护范围为线路全长的 80%。总仿真时间为 8 s，5 s 时于 MN 线路中点设置一个三相金属性短路接地故障，持续 0.2 s。

1) SMES 装在线路出口

SMES 装在线路出口时，分别在线路 30%、50%、82%、85% 处设置三相接地短路，可以得到测量阻抗的仿真曲线如图 6 所示。图中，“Y”和“N”分别表示装 SMES、未装 SMES。

作区外，由图 6(c) 可看出，测量阻抗的曲线进入動作区，保护误动作。当短路位于线路 85% 处，在保护動作区外，由图 6(d) 可看出，测量阻抗的曲线保持在動作区外，保护正确不动作。

2) SMES 装在线路中点

SMES 装在线路中点时，分别在线路 30%、

50%、82%、85%处设置三相接地短路, 可以得到测量阻抗的仿真曲线如图 7 所示。

在图 7(a)、图 7(b)中, 短路位于线路 30%、50% 处。装设 SMES 后的测量阻抗与未装 SMES 相比几乎不变, 同第 3 节中 2) 所述。图 7(c)、图 7(d)的分

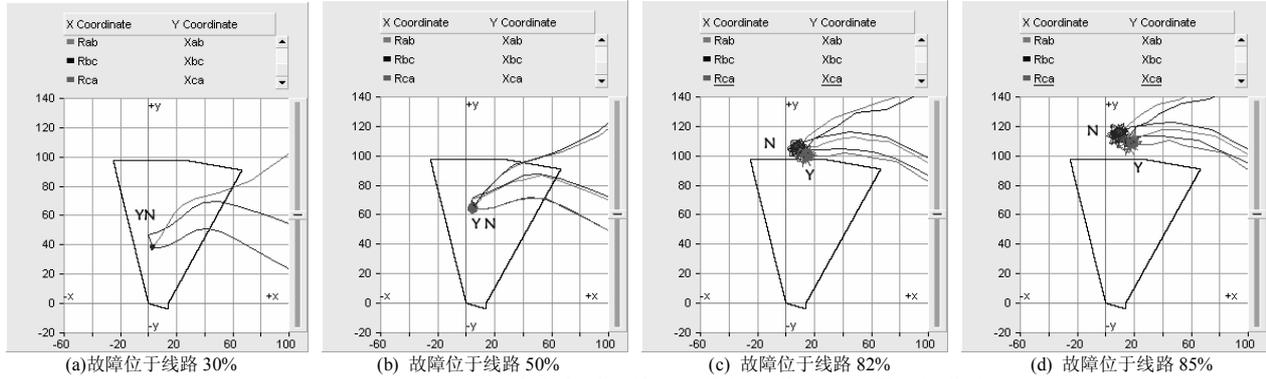


图 7 SMES 位于线路中点时保护的動作特性曲线和测量阻抗曲线

Fig. 7 Curves of measured impedance and tripping characteristic when SMES is at mid-point line

4.2 仿真结果

与以上仿真类似, 分别在线路 50%、82%、85% 处设置各种不同类型的短路故障, 仿真结果如表 1 中所示。其中 A-G、BC-G、ABC-G 分别表示 A 相接地短路、BC 相接地短路、三相接地短路, “O”、“X” 分别表示距离保护正确运行、保护误动作。

表 1 不同 SMES 位置、不同故障下的仿真结果

Table 1 Simulation results of different SMES location and fault

SMES 安装位置	线路出口			线路中点		
故障位置	50%	82%	85%	50%	82%	85%
A-G	O	X	O	O	X	O
BC-G	O	X	O	O	X	O
ABC-G	O	X	O	O	X	O

从图 6、图 7、表 1 中可以看出, 装设 SMES 后, 距离保护在大多数的短路故障时能正确动作,

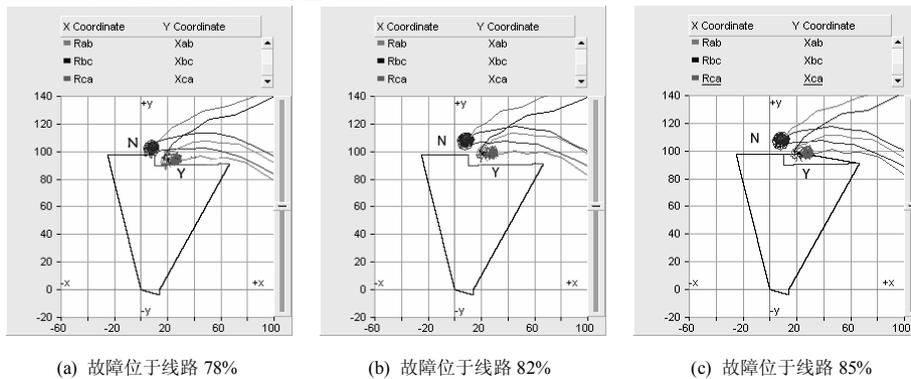


图 8 保护新動作特性和测量阻抗曲线

Fig. 8 Measured impedance and new tripping characteristic

析与图 6(c)、图 6(d)类似。对比图 7 与图 6 可看出当故障发生在大于线路 50% 处, SMES 装于线路中点处的测量偏移小于 SMES 装于线路出口处时, 即式(8)、式(12)中 $t > (t-50\%)$ 。

仅当短路故障发生在保护多边形动作区边界外附近时会误动作。

4.3 改进方案

当短路故障恰好发生在保护动作区边界上时, 测量阻抗的曲线进入多边形动作特性区的部分最多, 在本文仿真中即故障发生在线路 80% 处的距离保护临界动作情况。可将距离保护的多边形动作特性曲线稍作调整, 减去保护处于临界动作边界时测量阻抗的偏移值, 牺牲 I 段保护的部分保护范围以躲过保护误动作区, 如图 8 所示, 将能够改善装设 SMES 时的线路距离保护动作特性^[15-19]。

调整了距离保护特性后, 以 SMES 接在线路出口处为例, 三相接地短路故障时的多边形特性距离保护特性图的仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 当故障发生在多边形保护

动作区内, 即线路 78% 处时, 距离保护正确动作; 在动作区外, 即线路 82% 处、85% 处时, 保护不误动。调整多边形保护特性曲线后, 进行了不同

SMES 位置、不同故障的仿真计算, 结果如表 2 所示, 表明距离保护的動作情况在装设 SMES 时得到了明显改善, 在動作区内故障时正确動作, 区外时不误动。

表 2 保护動作区边界附近故障时的仿真结果
Table 2 Simulation results when fault occurs nearby tripping boundaries

SMES 安装位置	线路出口			线路中点		
	故障位置	78%	82%	85%	78%	82%
A-G	O	O	O	O	O	O
BC-G	O	O	O	O	O	O
ABC-G	O	O	O	O	O	O

5 结论

超导磁储能装置(SMES)可以进行四象限功率调节, 接入电网后能与电网双向交换功率, 提高电力系统安全稳定性, 但其充放电过程会对输电线路保护产生一定影响。本文在 PSCAD 环境下建立了 SMES 的电磁暂态模型, 对单机无穷大系统的输电线路多边形特性距离保护进行了仿真研究。计算结果表明, 接入 SMES 后, 测量阻抗值发生了变化, 当短路发生在保护動作区附近时保护会误動作; 本文提出了一个多边形動作特性曲线的改进方案, 仿真验证可以改善装设 SMES 后距离保护的動作情况。

参考文献

- [1] 杨军, 张哲, 尹项根, 等. 高温超导电缆保护研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 17-21.
YANG Jun, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Protection for high temperature superconducting power cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 17-21.
- [2] KAZEMI A, JAMALI S, SHATERI H. Effects of SMES equipped SSSC on distance relay tripping characteristic[C] // Transmission and Distribution Exposition Conference 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS, 2008.
- [3] JAMALI S, KAZEMI A, SHATERI H. Effects of SMES equipped UPFC on distance relay tripping characteristic[C] // 2008 Joint International Conference on Power System Technology POWERCON and IEEE Power India Conference, POWERCON, 2008.
- [4] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHANG Bao-hui, YIN Xiang-gen. Power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 诸嘉慧, 宝旭峰. 基于混合高温超导储能系统的电网动态功率补偿策略与试验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 20-26.
ZHU Jia-hui, BAO Xu-zheng. Power fluctuation compensation research in power system using a high temperature hybrid SMES[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 20-26.
- [6] 任安林, 田密. 普吉变电站超导电力设备运行分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 92-96.
REN An-lin, TIAN Mi. The operation research and analysis of superconductor power equipment at Yunnan Puji Substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 92-96.
- [7] 方进, 丘明, 范瑜, 等. 超导磁体失超检测电路的设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 245-253.
FANG Jin, QIU Ming, FAN Yu, et al. Design of the circuit in superconducting magnet quench detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 245-253.
- [8] 彭晓涛, 程时杰, 王少荣, 等. 一种新型的电流源型变流器 PWM 控制策略及其在超导磁储能装置中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 60-65.
PENG Xiao-tao, CHENG Shi-jie, WANG Shao-rong, et al. A novel PWM control for current source converter and its application in a superconducting magnetic energy storage unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 60-65.
- [9] 王素英, 丁坚勇. 基于 PSCAD/EMTDC 的距离保护 R-L 模型算法研究[J]. 电力学报, 2008, 23(4): 287-293.
WANG Su-ying, DING Jian-yong. Study on R-L model algorithms of distance relaying protection based on PSCAD/EMTDC[J]. Journal of Electric Power, 2008, 23(4): 287-293.
- [10] 张民, 贺仁睦. 基于 PSCAD/EMTDC 的直流控制保护系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 112-117.
ZHANG Min, HE Ren-mu. The HVDC control and protection simulation platform based on PSCAD/EMTDC and its application in HVDC projects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 112-117.
- [11] 刘玥朋, 江道灼. 限流式 UPFC 中 UPFC 模块与限流器

- 模块的交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 36-42.
- LIU Ya-peng, JIANG Dao-zhuo. Analysis of interaction between unified power flow controller module and fault current limiter module[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 36-42.
- [12] 张健, 冀瑞芳, 李国庆. TCSC 优化配置提高可用输电能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 23-28.
- ZHANG Jian, JI Rui-fang, LI Guo-qing. Study of enhancement of available transfer capability using TCSC optimal allocation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 23-28.
- [13] 张英. 静止同步补偿器对输电线路距离保护影响的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- ZHANG Ying. Effects of STATCOM on distance protection of transmission lines[D]. Xi 'an: Xi 'an University of Technology, 2008.
- [14] 张丽丽, 王新超. 短路电磁暂态过程对距离保护影响的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 35-39.
- ZHANG Li-li, WANG Xin-chao. Simulation analysis of the impact on distance protection caused by short-circuit electromagnetic transient process[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 35-39.
- [15] KARBALAYE Z M, SHAYEGANI A A A, RAVAGHI H. Analysis of impedance relaying procedure effected by STATCOM operation[C] // PEITS 2009-2009 2nd Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, 2009: 256-261.
- [16] ZHANG Zhong-chao, OOI Boon-teck. Multi-modular current-source SPWM converter for a superconducting magnetic energy storage system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1993, 8(3): 250-256.
- [17] 刘青, 王增平, 郑振华. 静止同步串联补偿器对距离保护影响分析的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 39-43.
- LIU Qing, WANG Zeng-ping, ZHENG Zhen-hua. Study on the influence of SSSC on the distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 39-43.
- [18] 刘青, 王增平, 张媛. 消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 93-98.
- LIU Qing, WANG Zeng-ping, ZHANG Yuan. Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 93-98.
- [19] 刘海洋, 谈顺涛. CVT 暂态特性对工频变化量距离保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34(2): 1-5.
- LIU Hai-yang, TAN Shun-tao. Influence of transient process of CVT on incremental power frequency distance relay[J]. Relay, 2006, 34(2): 1-5.

收稿日期: 2013-06-10; 修回日期: 2013-11-26

作者简介:

王 展(1976-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统稳定与控制方面的研究;

吴 威(1975-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护方面的研究;

张文嘉(1989-), 女, 通信作者, 硕士, 研究员, 主要从事电力系统规划方面的研究. E-mail: wudajia@126.com