

串联谐振型 FCL 对高压断路器开断短路故障的影响

耿淑娟, 张君捧, 张明玉

(山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 基于串联谐振型故障限流器的等效分析模型, 分别针对短路出线故障和近区故障, 详细研究了限流电感及其并联杂散电容对短路电流、断路器瞬态恢复电压第一个峰值以及瞬态恢复电压上升率的影响, 并综合以上指标得到了断路器苛刻度的变化规律。研究表明, 选取合适的限流电感、采取合理的措施改变限流电感并联杂散电容能够有效地降低断路器的苛刻度, 有利于断路器对短路故障的开断。

关键词: 串联谐振; 故障限流器; 出线故障; 近区故障; 断路器苛刻度

Influence of serial-resonant FCL on the characteristics of circuit breakers during short-circuit faults

GENG Shu-juan, ZHANG Jun-peng, ZHANG Ming-yu
(Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The equivalent model of serial-resonant fault current limiter (FCL) is presented, in which the stray capacitances are taken into account. With regards to FCL terminal fault and short-line fault in power transmission lines installed with serial-resonant FCL, the influence of current limiting inductance and its parallel stray capacitance on interrupting fault current, the first peak value of transient recovery voltage and rate of rise of transient recovery voltage of circuit breakers are analyzed. According to these analysis, the variation of severity of high voltage circuit breakers is summarized. The simulation results present that, in practical design of a serial-resonant FCL, selecting appropriate current limiting inductance and improving its stray capacitance by some effective means will be very beneficial for successful interruption of circuit breakers to the short-circuit faults.

Key words: serial-resonant; fault current limiter; terminal fault; short-line fault; severity of circuit breakers

中图分类号: TM56 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0032-06

0 引言

随着我国电力系统负荷的迅速增长以及大容量机组的不断投入运行, 短路电流水平也日益增高。电网内各种输变电设备, 诸如高压断路器、变压器、互感器以及变电站的母线、构架、导线、支撑绝缘子和接地网等, 必须满足短路电流水平提高所带来的更加苛刻的要求。故障限流器 FCL (Fault Current Limiter) 的研究对于解决电力系统短路电流水平超标问题具有重大意义。目前国内外研制的 FCL 结构形式不同, 且种类繁多。文献[1,2]提出的超导限流器具有响应速度快、自触发等特性, 但目前超导技术在电工领域的应用还受到许多具体条件的限制, 特别是在高电压、大功率场合的应用技术尚不成熟, 运行可靠性难以保证, 造价也极其昂贵; 文献[3,4]提出的固态桥式限流器采用可控电力电子器件, 结构简单, 可适应重合闸等复杂操作, 但只能应用于配电网, 其在高电压等级的实用受到一定限制, 有

赖于半导体器件技术的研究获得新进展; 文献[5~7]提出了串联谐振型 FCL, 这些方案在工程上具有可实现性, 又能适应电网的各种复杂操作, 是比较适用于高压甚至超高压电网的方案。

高压断路器是变电站的重要设备之一, 它不仅能够开合高压电路的正常工作电流, 而且当系统发生故障时, 它和保护装置、自动装置相配合, 迅速地切除故障电流, 以减少停电范围, 防止事故扩大, 保证系统安全运行。在电力系统发生短路故障时, 短路电流比正常负荷电流大得多, 因而开断短路故障是高压断路器最基本也是最困难的任务。

串联谐振型 FCL 在高压甚至超高压线路的实际应用可能在多方面对电网产生综合影响, 涉及暂态稳定、继电保护、断路器开断能力、电能质量等方面, 针对这些问题进行分析, 对 FCL 的工程实用化设计至关重要。文献[8,9]研究表明, 安装串联谐振型 FCL, 可明显改善电力系统在短路故障下的暂态稳定性, 提高其暂态稳定裕度。随着限流电抗的

提高, 系统的暂态稳定能力也会相应增强; 文献[10]研究了串联谐振型 FCL 对继电保护和电能质量的影响; 文献[11] 通过理论与推导, 给出了描述断路器的瞬态恢复电压上升率与限流比、杂散电容以及短路故障距离之间关系的严格数学表达式; 文献[12]对断路器瞬态恢复电压上升率进行了仿真计算。然而, 断路器的负担不仅与断口间的瞬态恢复电压上升率有关, 而且与开断电流、瞬态恢复电压的第一个峰值等因素有关。因此需要综合考虑以上因素, 从苛刻度^[13,14]的角度分析 FCL 对断路器开断性能的影响, 为串联型 FCL 的参数优化和高压断路器的优化选择提供理论依据。

1 串联谐振型 FCL 等效模型

串联谐振型 FCL 串联在线路中, 系统正常工作时, 电抗器与电容器发生串联谐振; 系统发生短路时, 快速将电容器短路, 从而将电抗器串入系统, 达到限制短路电流的目的^[5~7]。在断路器开断短路电流过程中, 串联谐振型 FCL 已经发生限流作用而呈现为高感抗值, 因此, 可将其等效为一个带有并联杂散电容和对地电容的电感, 如图 1 所示。其中, L_f 、 C_p 和 C_g 分别表示 FCL 的限流电感、并联杂散电容和对地杂散电容。

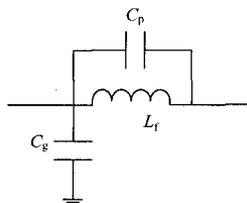


图 1 串联谐振型 FCL 的等效模型

Fig.1 Equivalent model of serial-resonant fault current limiter

2 系统模型

图 2 为安装有 FCL 的 220 kV 输电系统故障电路图及其等值电路。通常母线上接有不少电缆、架空线以及各种电力设备, 所以电源侧振荡频率 f_s 较低, 断路器侧的电感和对地电容分别为 $L_s=10$ mH, $C_s=0.35$ μ F; 阻尼电阻 R_r 为 75 Ω 。 L_1 、 C_1 为线路侧的电感与对地电容, 线路侧每公里电感与对地电容分别为 $l_1=0.8$ mH/km 和 $c_1=15$ nF/km, 离断路器 s km 处发生短路故障, 故 $L_1=l_1s$, $C_1=c_1s$ 。

在断路器标准中规定的瞬态恢复电压都指的是电网固有瞬态恢复电压, 即理想断路器开断无直流分量的交流电流时的瞬态恢复电压, 所以本文中的仿真模型, 采用理想断路器并且所开断短路电流中无直流分量。系统在 0.0 s 时刻发生出线短路, 故障

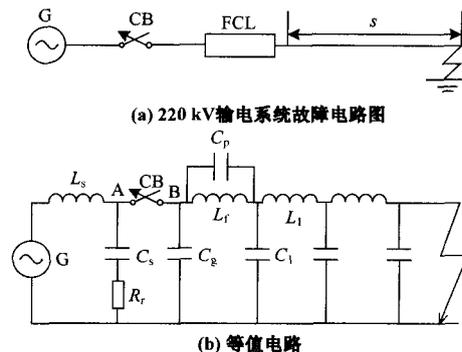


图 2 系统模型

Fig.2 Simulation model

点为 B 点, 0.1 s 时刻 CB 断开, 故障被切除。针对未安装 FCL 的出线故障进行仿真, 得到流过高压断路器 CB 的电流和电压波形如图 3 和图 4 所示。

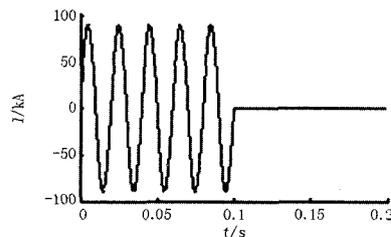


图 3 出线故障流过高压断路器的电流波形 (无 FCL)

Fig.3 Current wave of circuit breaker during terminal fault (without FCL)

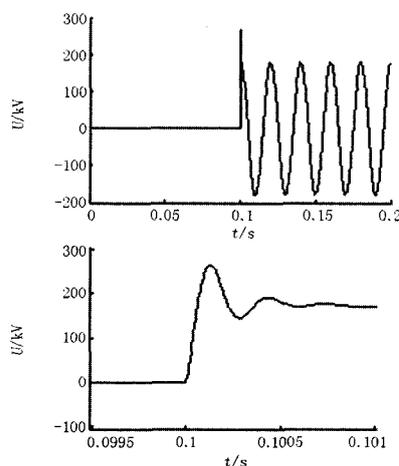


图 4 出线故障高压断路器的电压波形 (无 FCL)

Fig.4 Voltage wave of circuit breaker during terminal fault (without FCL)

由以上两图可知, 该系统预期最大短路电流为 63 kA_{rms}, 出线故障时断路器瞬态恢复电压上升率约为 2.0 kV/ μ s, 断路器恢复电压峰值约为 265 kV。

以上参数符合实际系统中出线故障断路器瞬态恢复最大值为一般工频恢复电压峰值 1.4~1.5 倍的要求；另外，其瞬态恢复电压含有高频分量，振荡频率 f_s 由 L_s 和 C_s 决定，一般衰减很快^[13-15]。

3 仿真分析

本文针对安装有 FCL 的 220 kV 输电系统发生短路故障的各种情况进行分析计算，仿真模型如图 2 所示。FCL 仿真参数如下：限流电感 $L_f=5$ mH，并联杂散电容 $C_p=50$ nF，对地杂散电容 $C_f=1$ nF。通过分析综合研究短路电流 I_{ss} ，电流过零时断路器瞬态恢复电压的上升率 $RRRV$ ，以及断路器瞬态恢复电压的第一个峰值 U_{tr1} ，即电网对于断路器的苛刻度 F ，综合评估安装串联谐振型 FCL 后对于高压断路器开断的影响。

$$F = I_{ss} \cdot (RRRV)^\alpha \cdot U_{tr1} \quad (1)$$

式(1)中： α 为常数，它与断路器的灭弧方式及灭弧介质有关。

3.1 FCL 出线故障

在安装串联谐振型 FCL 系统的 B 点发生出线故障后，流过高压断路器 CB 的电流如图 5 所示，图 6 为 A 点电压 u_A 波形，B 点电压 u_B 波形（FCL 上的电压波形）和 CB 上的端电压 u_{tr} 波形。

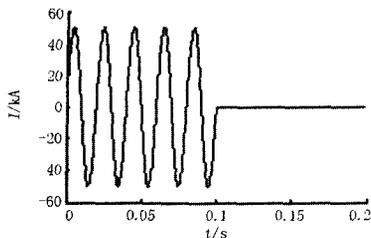


图 5 出线故障流过高压断路器的电流（有 FCL）

Fig.5 Current wave of circuit breaker during terminal fault (with FCL)

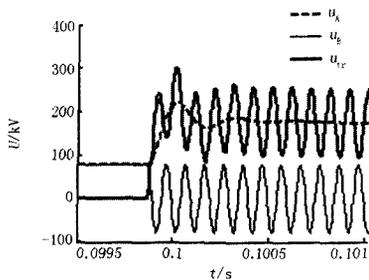


图 6 出线故障电压波形 ($L_f=5$ mH)

Fig.6 Voltage wave during terminal fault ($L_f=5$ mH)

比较图 5 和图 3 可知，限流电感为 5 mH 的 FCL 的安装将出线短路电流从 63 kA 下降为 35.48 kA，降低了短路电流水平，有利于高压断路器的开断。比较图 6 和图 4 可知，与安装 FCL 前的高压断路器的恢复电压相比，安装 FCL 后断路器的瞬态恢复电压第一个峰值有所下降由 265 kV 下降到 242 kV，瞬态恢复电压上升率有所增加由 2 kV/ μ s 上升到 4.25 kV/ μ s。因此，虽然短路电流水平和瞬态恢复电压第一个峰值都不同程度地减小，但是恢复电压上升率的迅速增加，断路器对于出线故障的开断可能更加困难。若灭弧常数 $\alpha=1$ ，则未安装 FCL 时，出线故障高压断路器的苛刻度 F_s 为 33 390，安装 FCL 后苛刻度为 36 367.76。本文将相应情况下未安装 FCL 时的断路器苛刻度设定为参照苛刻度，通过与它的比值来衡量断路器开断故障困难程度的变化。安装了限流电感为 5 mH 的 FCL 后，断路器相对苛刻度 F 为 1.09，因此，在这种情况下，FCL 的安装增大了断路器对短路故障的开断难度。

针对不同限流电抗并保持杂散电容不变，得到出线故障时短路电流、断路器瞬态恢复电压第一个峰值和瞬态恢复电压上升率变化曲线如图 7 所示。

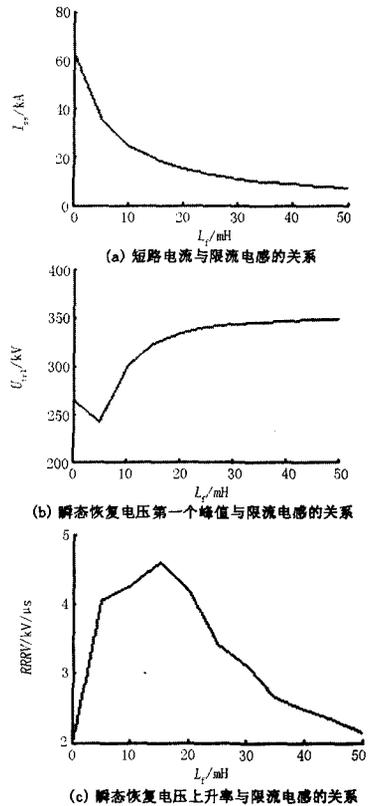


图 7 出线故障时断路器的指标与限流电感的关系

Fig.7 Relationship between indexes of circuit breaker and current limiting inductance during terminal fault

由图 7 可知, 随着限流电感的增加, 断路器开断电流随之减小, 瞬态恢复电压第一个峰值先减小后增大并且在限流电感为 5 mH 时取得最小值, 而瞬态恢复电压上升率先增大后减小在限流电感为 15 mH 时取得最大值。为了评估断路器开断难度随着限流电感增加的变化趋势, 本文针对不同灭弧常数 α 计算得到了断路器的相对苛刻度 (以未安装 FCL 的苛刻度为参照值), 如图 8 所示。

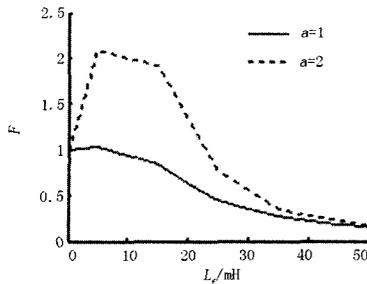


图 8 出线故障时断路器相对苛刻度与限流电感的关系
Fig.8 Relationship between the relative severity of circuit breaker and current limiting inductance during terminal fault

由图 8 可得, 对于安装 FCL 的输电系统发生出线故障, 随着限流电感的增加, 断路器的相对苛刻度先增大后减小。无论是灭弧常数为 1 还是 2, 在限流电感为 5 mH 的时候, 断路器相对苛刻度均取得最大值。本结论可以为串联谐振型 FCL 限流电感的选择不提供参考。

3.2 近区故障

安装串联谐振型 FCL 前后, 系统在距离 B 点 5 km 的线路上发生短路故障后, 流过高压断路器 CB 的电流如图 9 所示。图 10 分别为 A 点电压 u_A 波形, FCL 上的电压 u_{FCL} 波形, CB1 上的端电压 u_{tr} 波形和故障线路上电压波形 u_L 。

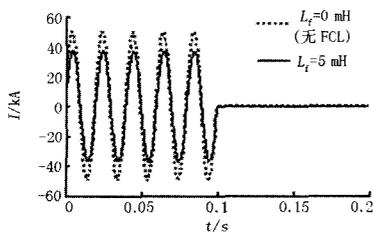


图 9 近区故障流过高压断路器的电流 ($s=5$ km)
Fig.9 Current wave of circuit breaker during short-line fault

系统中安装了串联谐振型 FCL, 若在距离 FCL 出线 5 km 处发生短路故障, 可以将短路电流从 38.18 kA 限制到 26.07 kA, 一定程度上减轻了断路器开断的难度。但是断路器瞬态恢复电压的第一个峰值、瞬态恢复电压上升率分别从 192.85 kV、

5.57 kV/ μ s 上升到 233.4 kV、6.55 kV/ μ s, 又相应增加了开断的难度, 因此需要从苛刻度的角度进行综合评估。

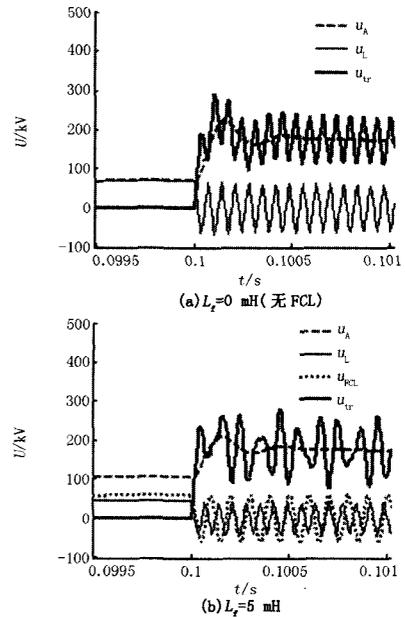


图 10 近区故障电压波形 ($s=5$ km)
Fig.10 Voltage wave during short-line fault

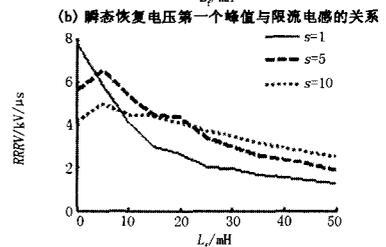
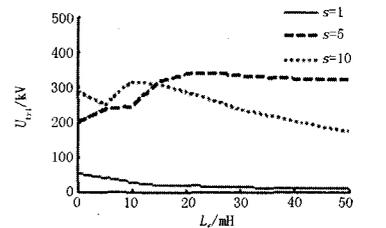
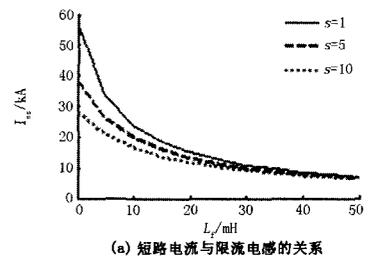


图 11 近区故障时断路器的指标与限流电感的关系
Fig.11 Relationship between indexes of circuit breaker and current limiting inductance during short-line fault

针对不同限流电感并保持杂散电容不变, 得到 1 km、5 km、10 km 处发生近区故障时短路电流、断路器瞬态恢复电压第一个峰值、瞬态恢复电压上升率变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知, 如果采用较大的限流电感, 不仅能取得较好的限流效果, 而且瞬态恢复电压的第一个峰值和瞬态恢复电压上升率均可小于未安装 FCL 时的相应数值, 有利于高压断路器的开断。为了准确确定近区故障时开断难度的变化, 针对灭弧常数 α 为 1 和 2 得到断路器的相对苛刻度与限流电感的 关系如图 12 所示。

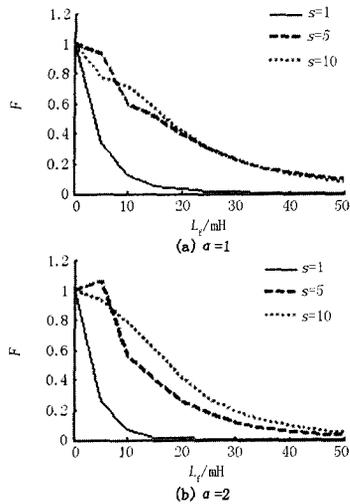


图 12 近区故障断路器相对苛刻度与限流电感的 关系

Fig.12 Relationship between the relative severity of circuit breaker and current limiting inductance during short-line fault

从图 12 不难看出, 当灭弧常数 $\alpha=1$ 时, 无论故障距离是 1 km, 5 km 还是 10 km, 通过与线路上未安装 FCL 时的苛刻度相比, 得到的高压断路器开断近区故障的相对苛刻度随着限流电感的增大而下降。在灭弧常数 $\alpha=2$ 的情况下, 当 $s=5$ km, $L_f=5$ mH 时断路器相对苛刻度取得最大值 1.054, 超过了未安装 FCL 时的开断难度, 随着限流电感的增加, 断路器的相对苛刻度基本呈现下降趋势。因此, 通过优化选择, 在系统中安装合适参数的 FCL 不仅能有效限制线路短路电流、保护系统中电气设备的安全, 同时能够有利于高压断路器开断近区故障。

3.3 FCL 并联杂散电容对断路器苛刻度的影响

文献[11,12]中研究结果表明, 系统中安装电感式 FCL, 当限流电感一定时, FCL 并联杂散电容 C_p 将对断路器的恢复电压上升率产生重要影响, 从而影响高压断路器开断短路电流的困难程度。串联型 FCL 也属于电感式 FCL 的范畴, 因此在限流电

感为 5 mH 的情况下, 本文针对不同 FCL 并联杂散电容 (10~100 nF) 时, 仿真分析了断路器的瞬态恢复电压首峰值和恢复电压上升率的变化趋势, 并综合各项指标对断路器相对苛刻度进行了计算。

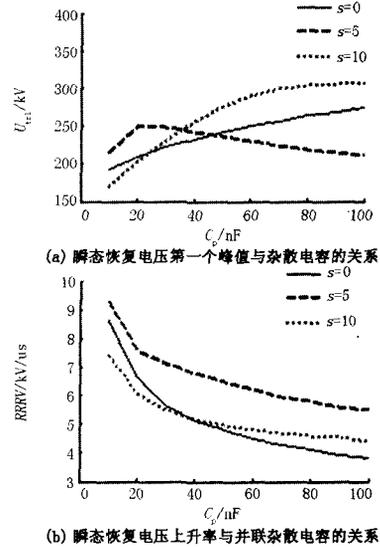


图 13 断路器的指标与杂散电容的关系

Fig.13 Relationship between indexes of circuit breaker and the stray capacitance

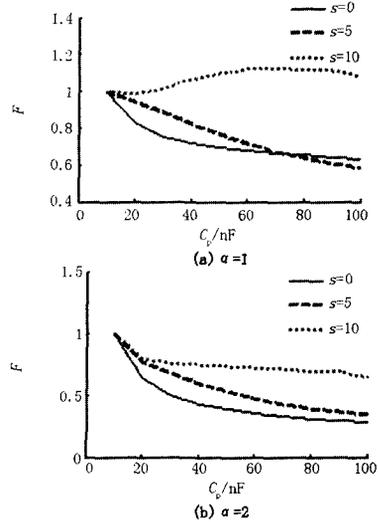


图 14 断路器相对苛刻度与杂散电容的关系

Fig.14 Relationship between the relative severity of circuit breaker and the stray capacitance

由于 FCL 限流电感一定, 并且 FCL 并联杂散电容 C_p 的容抗远远大于限流电感的电抗, 因此当 FCL 并联杂散电容变化时, 短路故障电流保持不变。基于以上原因, 本文不再针对断路器开断电流进行

分析, 其它两项指标如图 13 所示。当在 5 km 处发生短路故障时, 随着并联杂散电容的增大, 瞬态恢复电压第一个峰值先增大后减小; 当在 0 和 10 km 处发生故障, 瞬态恢复电压的第一个峰值随着并联杂散电容的增大而增大。无论是在 0, 5 km 还是 10 km 处发生短路故障, 随着 FCL 并联杂散电容的增大, 瞬态恢复电压上升率都呈现下降趋势。

高压断路器的相对苛刻度与 FCL 并联杂散电容的关系如图 14 所示 (此处均以 FCL 并联杂散电容为 10 nF 时断路器的苛刻度为参照值)。由图中可以看出, 除了灭弧常数为 $\alpha=1$ 、短路故障距离 $s=5$ km 处发生短路故障这种情况以外, 随着 FCL 杂散电容的增大, 断路器相对苛刻度呈下降趋势, 开断短路故障的困难程度下降。

4 结论

串联谐振型 FCL 应用于高压甚至超高压电网能够大大抑制系统的短路电流水平, 但是也可能增大断路器瞬态恢复电压第一个峰值以及瞬态恢复电压上升率, 从而将会导致断路器难以顺利开断短路故障。综合断路器开断电流、断路器瞬态恢复电压第一个峰值和瞬态恢复电压上升率三项指标, 针对安装串联谐振型 FCL 的输电系统, 本文对于断路器的开断短路故障的难度进行了评估。通过以上的分析, 不难看出, 系统中安装 FCL 后, 在某些情况下高压断路器的开断难度有所增加, 但是通过选择合适的 FCL 限流电抗, 同时采取措施改变杂散电容, 就能有效地降低高压断路器的开断难度。

参考文献

- [1] Kreutz R, Bock J, Breuer F, et al. System Technology and Test of CURL 10, a 10 kV, 10 MVA Resistive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1961-1964.
- [2] Tsuda M, Wlitani Y, Tsuji K, et al. Application of Resistor Based Superconducting Fault Current Limiter to Enhancement of Power System Transient Stability[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2122-2125.
- [3] 徐竹娟, 江道灼, 林日磊, 等. 三相不接地系统桥式固态限流器的故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 68-72.
XU Zhu-xian, JIANG Dao-zhuo, LIN Ri-lei, et al. A Fault Diagnosis Method for Solid-state Fault Current Limiters Used in Three Phase Ungrounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 68-72.
- [4] 章剑峰, 江道灼. 新型桥式固态限流器原理及试验研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 1-4.
- ZHANG Jian-feng, JIANG Dao-zhuo. The Principle and Test on Novel Bridge Solid-state Fault Current Limiter[J]. Relay, 2003, 31(10): 1-4.
- [5] 石晶, 邹积岩, 何俊佳, 等. 真空触发间隙式限流器的原理与实验研究[J]. 高压电器, 1999, (5): 3-7.
SHI Jing, ZOU Ji-yan, HE Jun-jia, et al. The Principle and Experiment on Fault Current Limiter with Triggered Vacuum Switch[J]. High Voltage Apparatus, 1999, (5): 3-7.
- [6] 肖茂友, 李庆民, 姜杰, 等. 两种经济型故障限流器的工作特性比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 71-75.
XIAO Mao-you, LI Qing-min, LOU Jie, et al. Comparative Analysis on the Operating Performance of Two Economical Type Fault Current Limiters[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2005, 17(4): 71-75.
- [7] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 谐振型故障限流器阻抗特性仿真和参数优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 61-64.
WANG Hua-xin, XI He-xun, TANG Guang-fu, et al. Simulation and Parameters Optimization of the Resonance Fault Current Limiter Resistance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 61-64.
- [8] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 99-103.
WANG Hua-xin, XI He-xun, TANG Guang-fu, et al. Application Research of Fault Current Limiter on the EHV Grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 99-103.
- [9] 刘洪顺, 李庆民, 徐亮, 等. 氧化锌避雷器式故障限流器对电力系统暂态稳定的影响[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 51-54.
LIU Hong-shun, LI Qing-min, XU Liang, et al. Influence of MOA-based FCL on Power System Transient Stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 51-54.
- [10] Henry S, Baldwin T. Improvement of Power Quality by Means of Fault Current Limitation[A]. in: Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium[C]. 2004. 280-284.
- [11] 刘洪顺, 李庆民, 姜杰, 等. 电感型 FCL 对断路器恢复电压上升率的影响[J]. 电工技术学报, 2008, 22(12): 84-91.
LIU Hong-shun, LI Qing-min, LOU Jie, et al. Impact of Inductive FCL on the RRRV of Circuit Breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 22(12): 84-91.

(下转第 42 页 continued on page 42)

- 神经元输出函数对 BP 模型动态修正的探索[J]. 继电器, 2004, 32(20): 21-24.
ZHANG Xi-ming, YAO Jian-gang, LI Li-ying, et al. Research of Dynamic Tuning of BP Model with Amending Nerve Cell Output Function in the Forecast of Pool Purchase Price[J]. Relay, 2004, 32(20): 21-24.
- [5] Yamin H Y, Shahidehpour S M, Li Z. Adaptative Short-term Electricity Price Forecasting Using Artificial Neural Networks in the Restructured Power Markets[J]. Electr Power Energy Syst, 2004, 26: 571-581.
- [6] 敖磊, 刘旭东, 吴耀武. 基于改进 DFNN 的短期电价预测新方法[J]. 继电器, 2006, 34(6): 34-38.
AO Lei, LIU Xu-dong, WU Yao-wu. A New Approach to Short-term Price Forecasting Based on Improved DFNN[J]. Relay, 2006, 34(6): 34-38.
- [7] 顾庆雯, 陈刚, 朱蕾蕾, 等. 基于遗传算法和径向基函数神经网络的短期边际电价预测[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 18-21.
GU Qing-wen, CHEN Gang, ZHU Lei-lei, et al. Short-Term Marginal Price Forecasting Based on Genetic Algorithm and Radial Basis Function Neural Network[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 18-21.
- [8] 杨波, 赵遵廉, 陈允平, 等. PSO 演化神经网络集成的边际电价预测新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 162-166.
YANG Bo, ZHAO Zun-lian, CHEN Yun-ping, et al. Novel Approach of Market Clearing Price Forecasting: PSO Based Evolutional Neural Network Mode[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 162-166.
- [9] 杨波, 赵遵廉, 陈允平, 等. 基于小波变换的边际电价神经网络预测新模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 40-44.
YANG Bo, ZHAO Zun-lian, CHEN Yun-ping, et al. A Novel MCP Forecasting Model Based on Wavelet Transformation and Neural Network Ensemble in Day-ahead Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 40-44.
- [10] Bugmann G. Normalized Gaussian Radial Basis Function Networks [J]. Neurocomputing, 1998, 20(1): 97-110.
- [11] Simon Haykin. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Second Edition[M]. U.S: Prentice Hall, 1998.
- [12] Moddy Y, Darken C. Fast Learning in Network of Locally Tuned Processing Unites[J]. Neural Computation, 1989,(1):281-294.
- [13] Chen S, Wu Y, Luck B. Combined Genetic Algorithm Optimization and Regularized Orthogonal Least Squares Learning for Radial Basis Function Networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(5): 1239-1243.
- [14] 郑丕涛, 马艳华. RBF 神经网络的阶梯遗传算法训练新方法[J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 165-168.
ZHENG Pi-e, MA Yan-hua. A New Hierarchical Genetic Algorithm for Training of RBF Neural Network[J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 165-168.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [J]. IEEE Int Conf Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [16] Clerc M, Kennedy J. The Particle Swarm Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [17] He S, Wu Q H, Wen J Y, et al. A Particle Swarm Optimizer with Passive Congregation[J]. Biosystem, 2004, (78): 135-147.

收稿日期: 2008-10-12; 修回日期: 2008-11-17

作者简介:

段其昌 (1953-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为网络智能, 电力市场;

赵敏 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, 电价预测; E-mail: zhaomin2002@163.com

王大兴 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压绝缘技术。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [12] Calixte E, Yokomizu Y, Shimizu H, et al. Reduction of Rating Required for Circuit Breakers by Employing Series-connected Fault Current Limiters[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 2004, 151(1): 36-42.
- [13] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LIN Shen. Technology of Modern High Voltage Apparatus [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [14] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guo-zheng, ZHANG Jie-rong, QIAN Jia-li, et al. Principle and Application of High Voltage Circuit Breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

- [15] 钱家骊, 张节容, 吉嘉琴, 等. 高压开关开合电容电流和小电感电流[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
QIAN Jia-li, ZHANG Ji-rong, JI Jia-qin, et al. Switching Capacitive and Small Inductive Current of Circuit Breaker[J]. Beijing: China Power Electric Press, 1999.

收稿日期: 2008-10-15; 修回日期: 2008-11-11

作者简介:

耿淑娟 (1976-), 女, 讲师, 主要从事信号处理以及电气领域的相关科学研究工作; E-mail: sdaigsj@163.com

张君捧 (1978-), 女, 讲师, 主要从事数字图像处理以及电气领域的相关科学研究工作。