

可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置在 SVC 模式下控制域解析

郭捷¹, 江道灼¹, 李海翔²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 运行在 SVC 模式下的可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置, 其整流阀触发角的调节范围(控制域)通常在 90° 附近的较小区间内, 但缺乏明确的分析。结合装置运行时的基本约束条件, 从考虑换相角的前提下各量与触发角间的关系出发, 分析了其在无功补偿运行模式下的控制域和无功补偿量解析表达式, 并对分析结果的正确性进行仿真验证。研究结果对可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置参数分析及控制参数优化设计具有参考价值。

关键词: 可控整流器; 直流融冰兼 SVC 装置; SVC 模式; 触发角; 控制域解析

Control domain analysis of controlled rectifier type SVC/DC-deicer on SVC mode

GUO Jie¹, JIANG Dao-zhuo¹, LI Hai-xiang²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The trigger angle α is in a narrow area near 90° when controlled rectifier type SVC/DC-deicers are being operated on SVC mode, but analysis on the control domain is deficient and undefined. The control domain is confirmed and the VAR character function in the control domain is proposed by function derivations. These derivations, including the relationships between I , U_d , I_d and α , are based on its operation constraints. The control domain is defined and analyzed. Simulation demonstrates the proposed control domain analysis is feasibility and effectiveness. These results can be used in parameters analysis or controller's parameters optimizations of controlled rectifier type SVC/DC-deicers.

Key words: controlled rectifier; SVC/DC-deicer; SVC mode; trigger angle; control domain analysis

中图分类号: TM855 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0093-05

0 引言

2008 年初发生在我国南方大部地区的低温雨雪冰冻天气, 致使众多输电线路因严重覆冰而发生断线、倒塔, 仅国家电网公司所辖电网的直接经济损失就高达 104.5 亿元^[1]。因这次冰灾引发的受灾地区长时间停电事故, 严重影响了国民经济与日常生活。

输电线路覆冰对电力系统乃至国民经济构成严重威胁, 因此其防除冰问题备受关注。可采用热力融冰、机械除冰等方法对输电线路实施除冰^[2], 其中热力融冰法因其具有除冰效率高、可操作性强等特点, 近年来备受关注并获得实际应用^[3-10]。

可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置是一种兼具热力融冰与动态无功补偿功能的 FACTS 装置, 在电力系统中具有较广阔的应用前景, 本文研究其在 SVC 模式下的控制域问题。

1 可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置

直流大电流融冰法对电源容量要求低, 可融冰线路长, 融冰时对系统冲击小, 可以对 500 kV 线路进行融冰作业, 易于结合 FACTS 装置实现复合功能, 从而提高装置的综合利用率和经济效益, 故而有良好的技术发展前景。我国目前已研发出基于大功率晶闸管的两类直流融冰兼 SVC 装置并投入实际应用, 即所谓的 TCR 型和可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置^[8-10]。

TCR 型直流融冰兼 SVC 装置的主电路原理结构如图 1 所示。它具有作为无功补偿运行时(见图 1(a))产生的谐波较小、无功补偿响应速度快等优点; 但其在 SVC 模式与直流融冰模式(见图 1(b))下的主电路拓扑结构与控制方式都不同, 切换操作复杂且影响装置可靠性。

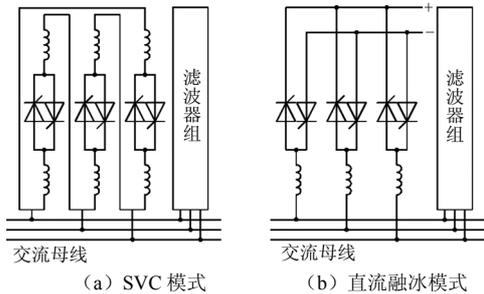


图 1 TCR 型直流融冰兼 SVC 装置主电路原理结构

Fig.1 Structure of TCR type SVC/deicer

可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置的主电路原理结构如图 2 所示，主要由整流阀、交流滤波器组、平波电抗器、工频滤波器及隔离闸刀等构成，其中隔离闸刀（图中为 G_D 、 G_M ）用来实现装置在无功补偿与直流融冰两种模式之间的切换操作。当装置运行于直流融冰模式时， G_D 断开、 G_M 闭合，此时可控整流阀直流侧经平波电抗器 (L_d) 向待融冰线路（末端短接）输出融冰直流电流，工频滤波器则用来滤除正在运行的邻近平行线路感应到待融冰线路的工频信号，以免其对装置的运行控制产生不利干扰。

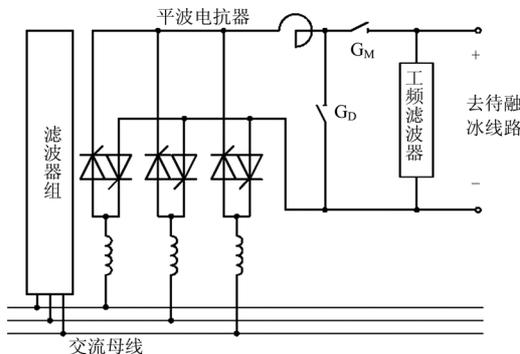


图 2 可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置原理结构

Fig.2 Structure of controlled rectifier type SVC/deicer

当装置运行于 SVC 模式时， G_D 闭合、 G_M 断开，即可控整流阀直流侧经平波电抗器 L_d 短接。由于直流侧平波电抗器的 $\omega L_d \gg R_d$ ，亦即此时整流阀基本上只消耗无功功率（有功损耗很小），因此可等效为感性无功源，其与固定容量的容性无功源（交流滤波器组等效）联合，构成连续可调无功补偿装置。该装置既可以发出无功（整流桥吸收无功量小于滤波器组补偿无功量），又可以吸收无功（整流桥吸收无功量大于滤波器组补偿无功量），从而起到对系统进行无功补偿的目的。

与图 1 所示的 TCR 型直流融冰兼 SVC 装置相比，可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置作为无功补

偿运行时产生的谐波相对较大、无功补偿响应速度也略慢一些，但其在 SVC 模式和直流融冰模式下的主电路拓扑结构和控制方式基本不变，具有切换操作简单且不影响装置可靠性的突出优点。

2 装置 SVC 模式下的特点与控制要求

如前所述，可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置在 SVC 模式下运行时，其直流侧通过平波电抗器（满足 $\omega L_d \gg R_d$ ）短接，因此从交流侧输入的稳态基波无功满足式(1)关系^[11]：

$$Q_{(1)} \approx 1.35 U I_d \sin(\alpha + \frac{\gamma}{2}) \quad (1)$$

式中： U 为换相电压有效值； I_d 为直流电流平均值； α 为触发角； γ 为换相角。

可见要保证装置稳态情况下基本吸收无功功率，必须控制触发角使 $(\alpha + \gamma / 2) \approx 90^\circ$ ，亦即 α 角调节范围（即控制域）只能在 90° 附近较小范围内且与换相角相关。因此有必要分析直流融冰兼 SVC 装置在 SVC 模式下运行时的控制域，以确保装置的安全、稳定运行，并为其控制器设计以及控制参数的确定提供理论依据。

3 装置 SVC 模式下吸收的无功表达式

下面从分析装置运行于 SVC 模式且考虑换相过程时的无功功率特性入手，推导其控制域的解析表达式。分析时假设：

(1) 装置输入端三相交流电源正弦（考虑装置运行过程中安装有配套滤波器）、对称，三相参数也对称；

(2) 忽略装置中晶闸管损耗；

(3) 整流阀工作在 2-3 模式（即整流阀非换相其间有 2 只阀导通，换相其间有 3 只阀导通的模式）下，且换相角 $\gamma < 60^\circ$ ^[11-12]。

装置在 SVC 模式下运行时的等值电路如图 3 所示。图中 u_a 、 u_b 、 u_c 为系统等值电源相电压； X_γ 为等值换相电抗，其值视具体装置拓扑确定，大小等于接入点处系统等值电源与整流阀构成的回路之间的所有电抗值之和； $Z_d (=R_d + jX_d)$ 是直流侧平波电抗器阻抗。

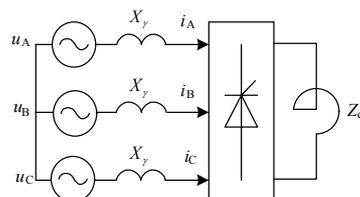


图 3 无功补偿模式下装置等值电路

Fig.3 Equipment circuit on SVC mode

装置在 SVC 模式下的总无功消耗为

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{3U^2 I^2 - U_d^2 I_d^2} \quad (2)$$

式中: S 、 P 分别为装置交流侧输入视在功率和有功功率; U 、 I 为交流侧线电压、电流有效值; U_d 、 I_d 为直流侧平均电压、电流。

忽略装置自身功耗时, 交流侧输入与直流侧输出有功相等, 即 $P = U_d I_d$ 。因此装置在 SVC 模式下消耗的基波无功功率可近似表达为

$$Q_{(1)} = P \tan \varphi_{(1)} \approx U_d I_d \tan\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (3)$$

3.1 整流阀直流侧 U_d 、 I_d 与 α 的关系

考虑 γ 时, 整流阀直流侧平均电压、电流分别为^[11]

$$U_d = 1.35U \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) = 0.675U [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (4)$$

$$I_d = \frac{\sqrt{2}U}{2X_\gamma} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = U_d / R_d \quad (5)$$

联立求解式 (4)、(5) 并整理, 可得

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{R_d - 0.95X_\gamma}{R_d + 0.95X_\gamma} \cos \alpha\right) - \alpha \quad (6)$$

$$I_d = \frac{1.35U}{0.95X_\gamma + R_d} \cos \alpha \quad (7)$$

3.2 整流阀交流侧电流 I 与 α 的关系

考虑 γ 时整流阀交流侧电流有效值为

$$I = 0.816I_d \sqrt{1 - 3\Psi(\alpha, \gamma)} = \frac{1.10U \cos \alpha}{0.95X_\gamma + R_d} \sqrt{1 - 3\Psi} \quad (8)$$

式中:

$$\Psi(\alpha, \gamma) = \frac{[2 + \cos(2\alpha + \gamma)] \sin \gamma}{2\pi [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]^2} - \frac{\gamma [1 + 2\cos \alpha \cos(\alpha + \gamma)]}{2\pi [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]^2}$$

3.3 装置消耗无功 Q 、 $Q_{(1)}$ 与 α 的关系

将式 (4)、(7)、(8) 代入式 (2) 并整理, 得

$$Q = \frac{1.35K_1 U^2}{0.95X_\gamma + R_d} \cos \alpha \quad (9)$$

$$\text{式中: } K_1 = \left[2 - 6\Psi + \frac{1.83R_d^2}{(0.95X_\gamma + R_d)^2} \cos^2 \alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

同样将式 (4)、(7) 代入式 (3) 并整理, 得

$$Q_{(1)} = \frac{1.82U^2 K_2}{0.95X_\gamma + R_d} \cos \alpha \quad (10)$$

$$\text{式中: } K_2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{R_d - 0.95X_\gamma}{R_d + 0.95X_\gamma} \right)^2} \cos^2 \alpha + \sin \alpha \right]^\circ$$

式 (9)、(10) 分别描述了在考虑换相过程时, 装置在 SVC 模式下的总无功消耗和基波无功消耗与触发角 α 之间的关系。

上述 Q 与 $Q_{(1)}$ 略有差别, 但从仿真结果可以看出, 当 α 角较大时它们差别不大。因此在考虑装置无功补偿运行对系统的无功补偿作用时, 可以只考虑其基波无功消耗。

4 装置在 SVC 模式下的控制域

4.1 控制域分析

图 4 为根据式 (7)、(9)、(10) 画出的 I_d - α 、 Q - α 和 $Q_{(1)}$ - α 特性曲线。图中, α_1 对应于 $\gamma = 60^\circ$ 时的触发角; α_2 对应于装置吸收基波无功最大值 $Q_{(1)\max}$ 时的触发角; α_3 对应于装置直流侧电流为 1.2 pu 时的触发角。

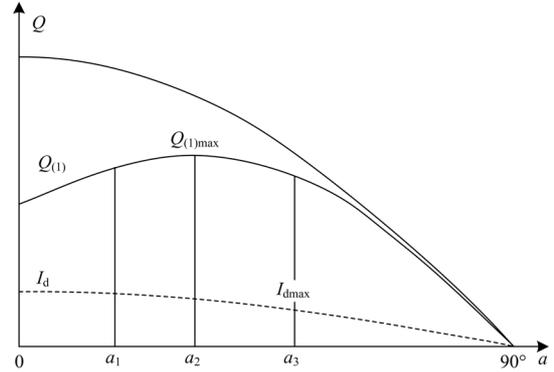


图 4 装置无功补偿模式下整流桥吸收无功功率特性

Fig.4 Var character on SVC mode

装置运行过程中的控制域 (即 α 角调节范围) 受下列条件限制:

(1) 防止晶闸管发生过流损坏的最大电流限制^[13], 一般取最大电流限值 $I_{\max} = 1.2$ pu, 则应有 $\alpha > \alpha_3$ (结合图 5, 下同);

(2) 确保整流阀非换相期间 3 只阀导通, 其他时间 2 只阀导通, 即换相角 $\gamma < 60^\circ$, 则应有 $\alpha > \alpha_1$;

(3) 确保在 α 调节范围内 $Q_{(1)}$ 单调的解域限制, 因为若非单调, 则可能对于某一确定的 $Q_{(1)}$ 存在 α 值多解的情况, 这对于 PI 调节器是不允许的。由图 5 可知, 在 $\alpha = 0 \sim 90^\circ$ 内, 式 (10) 非单调; 又由式

(1) 可知, $Q_{(1)}$ 与 I_d 近似成正比, 而整流阀特性为 I_d 随 α 增大而减小^[11], 即 $Q_{(1)}$ 应随 α 增大而减小。所以, 满足 $Q_{(1)}$ 单调的解域为 $\alpha > \alpha_2$ 。

综上, 装置在 SVC 模式下的稳态控制域可表达为

$$(\alpha_1, 90^\circ) \cap (\alpha_2, 90^\circ) \cap (\alpha_3, 90^\circ) \quad (11)$$

由图 4 可知 $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$, 所以装置在 SVC 模式下的稳态控制域为 $(\alpha_3, 90^\circ)$ 。若考虑动态调节时电流 I_d 在短时间内允许大于 I_{dmax} , 则反映在 α 控制域上可以简单地修正为 $(\alpha_3 - \Delta\alpha, 90^\circ)$, 且应满足 $(\alpha_3 - \Delta\alpha) < \max(\alpha_1, \alpha_2)$, 其中 $\Delta\alpha$ 为正值。

4.2 仿真算例

假设直流融冰兼 SVC 装置的整流阀为三相六脉结构, 直流侧输出额定容量/电流=240 MW/5 kA, 交流系统等值为“无穷大”电源 ($Z_s=0, f=50$ Hz), 额定线电压=35 kV; 等效换相电抗电感值 $L_\gamma=1$ mH、电阻值 $R_\gamma=0.006 \Omega$; 直流侧平波电抗器电感值 $L_d=20$ mH, 电阻值 $R_d=0.126 \Omega$ 。另外为研究整流阀无功特性, 滤波器组未投入。根据这些参数所建立的装置在 SVC 模式下的仿真模型如图 5 所示。

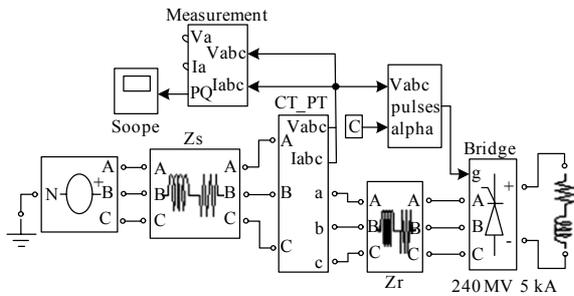


图 5 装置无功补偿模式下仿真模型框图
Fig.5 Model blocks for simulation on SVC mode

图 6 中的散点为给定不同 α 角情况下装置在 SVC 模式下吸收的稳态无功功率仿真结果, 为便于比较, 图中同时给出了相同参数下按式 (9) 计算绘制出的装置吸收无功功率变化曲线。由图可知, 当 $\gamma < 60^\circ$ 时 (对应于 $\gamma = 60^\circ$ 的 $\alpha_3 \approx 47^\circ$), 仿真结果与式 (9) 计算结果基本吻合, 证明前面推导的装置在 SVC 模式下吸收无功功率表达式是正确的。由图还可看出, 装置在 SVC 模式下满足式 (10) 的控制域为 $(\alpha_3 - 90^\circ) \sim \alpha_3$ 为 $I_d = -6$ kA 时的触发角

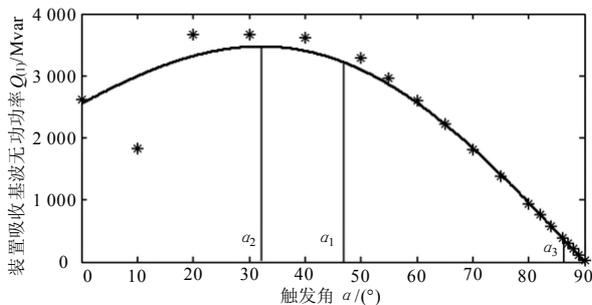


图 6 装置工作无功补偿模式下仿真结果
Fig.6 Result of var character on SVC mode

图 7 为在控制域 $(\alpha_3, 90^\circ)$ 内, 装置运行于 SVC 模式时所吸收的基波无功 $Q_{(1)}$ 随 α 变化的仿真结果, 可见 $\alpha_3 \approx 87^\circ$, 亦即其稳态控制域为 $(87^\circ, 90^\circ)$ 。

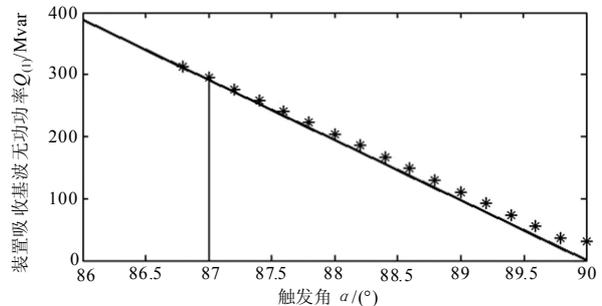


图 7 装置工作在无功补偿模式下控制域内仿真结果
Fig.7 Result of var character in control domain

图 8 为装置在 SVC 模式下定无功闭环 PI 调节器控制运行, 无功定值由 100 Mvar 阶跃到 80 Mvar 时触发角 α 的动态变化过程仿真结果, 可见其稳态值在控制域范围内。

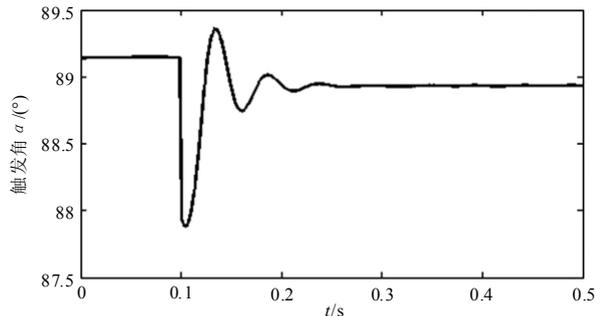


图 8 触发角 α 在控制域内动态变化情况
Fig.8 Trigger angle in control domain

5 结论

本文对可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置在 SVC 模式下运行且考虑换相过程情况下, 其触发角 α 的可行调节范围 (控制域) 进行了分析研究, 推导出了满足约束条件下其所消耗无功功率 Q 与触发角 α 之间的解析表达式, 并通过仿真算例验证了该表达式的正确性。并获得了其控制域通常以防止晶闸管不发生流损坏的最大电流为最严厉约束条件的结论。研究结果对可控整流器型直流融冰兼 SVC 装置参数分析及控制参数优化设计具有实用价值。

参考文献

[1] 李庆峰, 范峥, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (9): 33-36.
LI Qing-feng, FAN Zheng, WU Qiong, et al.

- Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32 (9) : 33-36.
- [2] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
JIANG Xing-liang, YI Hui. Icing and its protection of transmission lines[J]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] Horwill C, Davidson C C, Granger M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE PES. 2005/2006:529-534.
- [4] Petrenko V, Sullivan C. Methods and systems for removing ice from surfaces[P]. US: PCT/ US99/ 28330 (CIP), 1999-11-30.
- [5] McCurdy J D, Sullivan C R, Petrenko V F. Using dielectric losses to deice power transmission lines with 100 kHz high-voltage excitation[C]//Industry Application Conference 2001, Thirty-sixth IAS annual meeting conference record of the 2001 IEEE. 2001: 2515-2519.
- [6] Petrenko V F, Higa M, Starostin M, et al. Pulse electro thermal de-icing[C]//Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003: 434-438.
- [7] 山霞, 舒乃秋. 关于架空输电线除冰措施的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32 (4) : 25-27.
SHAN Xia, SHU Nai-qiu. Discussion on methods of de-icing for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (4) : 25-27.
- [8] 许树楷, 黎小林, 饶宏, 等. 南方电网500 kW直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2 (4) : 32-36.
XU Shu-kai, LI Xiao-lin, RAO Hong, et al. Development and test of 500 kW DC de-Icer in China Southern Power grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2 (4) : 32-36.
- [9] 梁一桥. 具有静止式动态无功补偿功能的直流大电流融冰装置: 中国, 200810060026[P]. 2008-08-06.
LIANG Yi-qiao. DC-deicer with SVC function: China, 200810060026[P]. 2008-08-06.
- [10] 彭卫, 李晓莉, 谭富堂, 等. 融冰装置在韶关现场试验成功. [N/OL]. 2009-03-01. http://www.ycwb.com.
PENG Wei, LI Xiao-li, TAN Fu-tang, et al. DC-deicer is tested and operated successfully in shaoguan[N/OL]. 2009-03-01. http://www.ycwb.com.
- [11] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
DAI Xi-jie. Basic of HVDC[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990.
- [12] 黄凯. 交直流混合电力系统概率稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
HUANG Kai. The probabilistic stability research for hybrid AC/DC power system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002.
- [13] Sood V K. HVDC and FACTS controllers[M]. Netherlands: KAP, 2004.

收稿日期: 2009-08-21; 修回日期: 2009-10-21

作者简介:

郭捷(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柔性交直流输电技术; E-mail: guojie@zju.edu.cn

江道灼(1960-), 男, 教授, 主要研究方向是交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术等; E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

李海翔(1963-), 男, 教授级高工, 浙江省电力公司总工程师, 主要研究方向为电力系统运行、调度控制技术。

(上接第 33 页 continued from page 33)

QUAN Yu-sheng, WANG Xiao-rong, YANG Min-zhong, et al. Two new algorithms and their robustness for two-terminal fault location on HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 28-32.

作者简介:

林富洪(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhubolinfuluhong@163.com

王增平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等;

李金龙(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统广域保护。

收稿日期: 2009-08-12; 修回日期: 2009-11-03