

DOI: 10.7667/PSPC170452

# 直流混合型超导限流器强迫换流方法研究

张谢天, 庄劲武, 高海林, 曾主东

(海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 针对现有断路器开断容量不能满足现代舰船直流电力系统短路电流分断要求的现状, 提出了一种直流混合型超导限流器的方案。舰船直流电力系统短路电流上升率高达  $20 \text{ A}/\mu\text{s}$ , 该限流器需要完成短路电流的快速换流, 研究了强迫换流方法。讨论了直流混合型超导限流器的工作原理, 对限流器的限流过程进行了分析。在给定电力系统短路电流参数的条件下, 结合电路仿真软件, 对辅助换流支路参数进行了设计。实验结果表明, 强迫换流的方法在  $38 \mu\text{s}$  内完成了上升率为  $20.4 \text{ A}/\mu\text{s}$  的  $7680 \text{ A}$  的短路电流的换流, 混合型方案具有可行性, 强迫换流的方法能够实现短路电流的快速换流。

**关键词:** 混合型; 超导限流器; 强迫换流

## Study on forced commutation method of DC hybrid superconducting fault current limiter

ZHANG Xietian, ZHUANG Jinwu, GAO Hailin, ZENG Zhudong

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The existing circuit breaker capacity can't satisfy the status of modern ship DC power system short-circuit current disjunction. According to that, this paper proposes a hybrid type DC superconducting current limiter scheme; according to that short-circuit current rise rate of ship DC electric system is as high as  $20 \text{ A}/\mu\text{s}$ , the current limiter needs to complete rapid commutation of short circuit current, thus it researches the forced commutation method. This paper discusses the working principle of DC hybrid type superconducting current limiter and analyzes its limiting process. Under the condition of given parameters of power system short-circuit current, and combined with the circuit simulation software, the auxiliary commutation circuit branch parameters are designed. The experimental results show that the forced commutation method completes the communication of  $7680 \text{ A}$  short-circuit current with rise rate  $20.4 \text{ A}/\mu\text{s}$  in  $38 \mu\text{s}$ , the hybrid scheme is feasible, and the forced commutation method can achieve rapid communication of short circuit current.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607185).

**Key words:** hybrid; superconducting fault current limiter; forced current commutation

## 0 引言

舰船综合电力系统性能优良, 但是该中压直流电力系统极限短路电流峰值超过  $100 \text{ kA}$ , 现有开关设备难以满足分断要求, 急需对系统的短路电流峰值进行限制<sup>[1-8]</sup>。20世纪80年代后期, 随着高温超导体的发现, 高温超导故障限流器应运而生。超导限流器(SCFCL)主要是利用超导体在一定条件下发生的超导态/正常态转变, 快速而有效地限制电力系统中短路故障的一种电力设备<sup>[9-12]</sup>。但在高压尤其大电流( $3 \text{ kA}$ )条件下, 传统的超导限流器中超导元

件参与常态通流, 使得由铜排注入超导元件热量巨大, 为使超导元件一直处于液氮氛围中, 整个制冷系统的功率需求和体积会很大, 无法满足舰船安装需要<sup>[13]</sup>。本文采用的直流混合型超导限流器方案, 其超导元件不参与额定通流, 超导元件两端需要的铜导线截面积大大减小, 由导线注入的热量减小, 这使限流器的制冷功率需求和体积都大大减小。根据短路电流触发器触发值为  $6 \text{ kA}$  及各种器件接收到动作信号的延时时间为  $100 \mu\text{s}$ , 得出此限流器换流时需要将上升率为  $20 \text{ A}/\mu\text{s}$  的  $8 \text{ kA}$  短路电流从高速开关换流至超导元件。高速真空开关打开时弧压很低, 依靠触头弧压的自然换流方法无法完成换流。而短路电流上升率很大, 换流时间每增加  $50 \mu\text{s}$ , 短

路电流上升 1 kA, 这也将造成限流需要的超导元件数量增加、体积增大。为使短路电流能快速换流, 提出了强迫换流的方法, 结合电路分析和仿真进行了辅助换流支路的设计, 并在给定参数条件下, 进行了强迫换流仿真和实验。

## 1 混合型超导限流器系统模型

### 1.1 工作原理

图 1 为混合型超导限流器原理图。限流器主要由高速真空开关、辅助换流支路和超导元件三个部分并联组成。

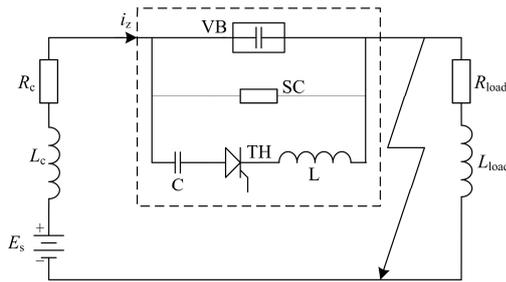


图 1 混合型超导限流器原理图

Fig. 1 Principle circuit of hybrid superconducting fault current limiter

当系统正常运行时, 电流  $i_z$  从高速真空开关 VB 上流过; 当系统发生如图 1 箭头所示的短路故障时, 控制器给高速真空开关发出动作信号, 经过机械延时后真空触头打开并产生电弧, 然后导通辅助换流支路的晶闸管 TH, 预先充电的电容 C 通过晶闸管 TH 和电感 L 对真空开关放电形成与主回路电流方向相反的脉冲电流, 当反向脉冲电流幅值等于短路电流时电弧熄灭, 主回路电流被完全换流至超导元件, 超导元件迅速表现为高阻抗, 将故障电流限制在较低的水平。

与传统的超导限流器相比, 混合型超导限流器将额定通流与故障限流功能分开处理, 高速真空开关承担额定通流功能使得通流容量大; 超导元件只承担故障限流功能, 其两端引线的截面积大大减小, 传导的热量也减小, 这就使得超导限流器的制冷功耗降低、制冷装置体积大为减小。

### 1.2 电路分析

在正常工作情况下, 主回路的额定电流  $i_z$  由高速真空开关流过, 高速真空开关的接触电阻很小, 超导元件分流可以忽略, 电路方程为

$$U_E = (R_c + R_{load}) i_z \quad (1)$$

在短路故障时, 限流器会采取一系列动作来限制短路电流, 可以将限流器整个限流过程分为燃弧、

强迫换流和限流三个阶段。

在燃弧阶段高速真空开关打开, 晶闸管 TH 为关断状态, 高速真空开关触头燃弧, 主回路电流部分换流至超导元件, 限流器等效电路图如图 2 所示。真空开关打开后产生的电弧电压根据其方向用相对应的直流电压源近似, 在换流阶段超导元件不失超, 用电阻和电感串联近似, 此时等效电路由超导电感  $L_{sc}$  和超导电阻  $R_{sc}$  串联后和直流电压源并联, 线路电阻非常小, 可以忽略不计。

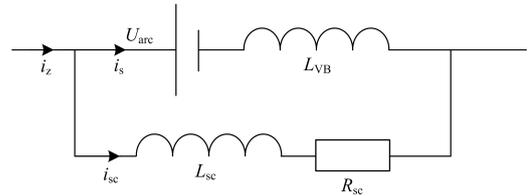


图 2 燃弧阶段限流器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of arc current limiter

燃弧阶段部分换流方程为

$$i_z = i_s + i_{sc} \quad (2)$$

$$L_{VB} \frac{di_s}{dt} + U_{arc} = L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} + R_{sc} i_{sc} \quad (3)$$

式中:  $L_{VB}$  为真空开关的电感;  $i_s$  为流过高速开关的电流;  $U_{arc}$  为真空开关的电弧电压;  $i_{sc}$  为换流至超导元件的电流;  $i_z$  为主回路短路电流。

在强迫换流阶段高速真空开关打开, 晶闸管 TH 导通, 辅助换流支路电容放电, 由于相比超导元件电感, 高速真空开关的电感非常小, 在此阶段辅助换流支路发出的脉冲电流可以认为全部流向高速真空开关支路, 此时高速真空开关上电流开始换流至超导元件, 当高速真空开关上电流降为零时触头熄弧, 短路电流完全换至超导元件, 强迫换流阶段等效电路图如图 3, 晶闸管导通时电阻非常小, 可以忽略不计。强迫换流阶段电路方程为

$$i_z = i_{sc} + i_s + i_c \quad (4)$$

$$-u_c + LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} = L_{VB} \frac{di_s}{dt} + U_{arc} \quad (5)$$

$$-u_c + LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} = L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} + i_{sc} R_{sc} \quad (6)$$

$$u_c = U_{c0} \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$i_c = \frac{U_{c0}}{\sqrt{L/C}} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (8)$$

式中:  $i_c$  为辅助换流支路发出的脉冲电流;  $L$  为辅助换流支路电感;  $C$  为辅助换流支路电容量;  $U_{c0}$

为  $C$  的预充电电压。

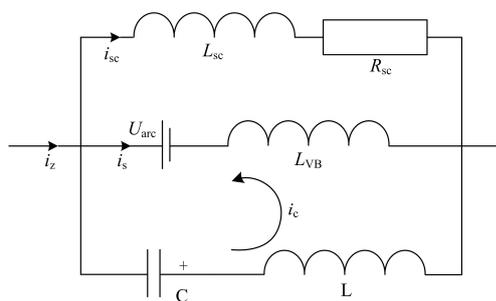


图3 强迫换流阶段限流器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of forced commutation stage current limiter

在限流阶段高速真空开关断开，短路电流流过超导元件，随着流经超导元件的电流增加，超导元件失超，电阻迅速增大，从而将短路电流限制到一个较低的水平。

## 2 强迫换流仿真分析

为了确定辅助换流支路的参数，对混合型超导限流器强迫换流过程进行仿真。

辅助换流支路参数的确定需要遵循以下三点原则：① 能让真空触头上电流迅速过零，从而快速换流以减小超导元件需要限制的电流，进而可以减小超导元件的体积；② 电容、电感参数的选择需要遵循使装置小型化的要求，即尽量做到低能量换流；③ 根据前期经验，在保有安全余量和工程化角度考虑辅助换流支路脉冲电流上升率  $di/dt$  应小于  $300 \text{ A}/\mu\text{s}$ <sup>[14-19]</sup>。

强迫换流仿真模型如图4所示。模型中的短路电流是利用预充电的电容  $C_z$  充当直流源，真空开关由两条支路并联组成。正常通流时，电流由闭合的理想开关  $K3$  流过，此时理想开关  $K1$  处于分闸状态，理想开关  $K2$  处于合闸状态；当检测装置检测到短路电流后，触发信号源，经过机械延时  $Y1$ ，闭合  $K1$  并打开  $K3$ ，触头开始燃弧，弧压用直流电压源  $E_{arc}$  来代替，经过燃弧延时  $Y2$ ，晶闸管  $TH$  导通，辅助换流支路电容  $C$  放电，发出与触头电流方向相反的脉冲电流，触头上电流逐渐被转移，当触头上电流完全被转移到超导支路后，检测装置给  $K2$  发关断信号，弧压支路的  $K2$  断开，触头熄弧换流完成。检测装置部分通过幅值比较器  $Compare$  和信号保持器  $remain$  组成。

表1为强迫换流仿真参数。在换流过程中超导元件不失超，线路电阻很小，超导元件用小电阻和小电感代替，根据辅助换流支路参数的确定原则结

合数值计算和仿真分析得到辅助换流支路电容容量  $C$  及预充电电压  $U_{CO}$ 、辅助换流支路电感  $L$  的最佳值分别  $400 \mu\text{F}$ 、 $650 \text{ V}$ 、 $2.4 \mu\text{H}$ 。

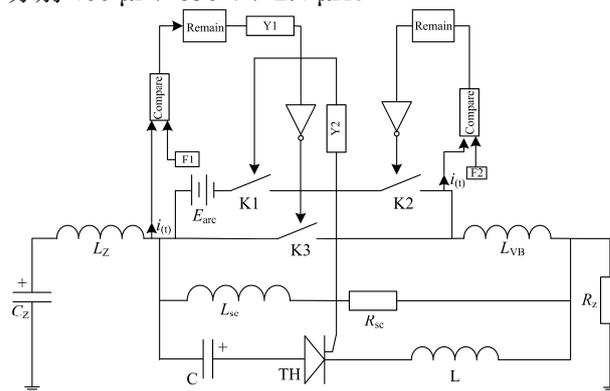


图4 强迫换流仿真模型

Fig. 4 Forced commutation simulation model

表1 强迫换流仿真参数

Table 1 Simulation parameters of forced commutation current

参数	数值	参数	数值
电容 $C_z/\text{mF}$	220	幅值 $F1$	5 000
电容 $C_z$ 预充电/ $\text{V}$	300	幅值 $F2$	0
电感 $L_z/\mu\text{H}$	7.5	机械延时 $Y1/\mu\text{s}$	120
电阻 $R_z/\text{m}\Omega$	22	燃弧延时 $Y2/\mu\text{s}$	164
弧压 $U_{arc}/\text{V}$	22	电感 $L_{sc}/\mu\text{H}$	1.6
触头电感 $L_{VB}/\mu\text{H}$	0.02	电阻 $R_{sc}/\text{m}\Omega$	2

利用 EMTP 进行仿真，得到如图5所示强迫换流的仿真电流波形。从仿真图形可得：采用强迫换流的方法，在由前得到的辅助换流支路参数下，在  $50 \mu\text{s}$  内完成了上升率为  $20 \text{ A}/\mu\text{s}$  的  $8 \text{ kA}$  短路电流的换流。

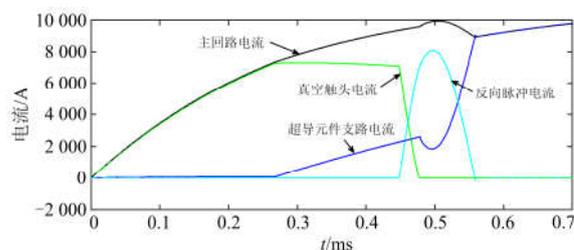


图5 强迫换流仿真电流波形

Fig. 5 Forced commutation simulation current waveform

## 3 强迫换流实验验证

为验证仿真的准确性及辅助换流支路参数的合理性，在实验室搭建实验平台进行验证实验。

实验平台如图6，在实验时，主回路放电、高速真空开关分闸、辅助换流支路放电的顺序由晶闸管导通控制，其时序控制策略为  $0$ 、 $200 \mu\text{s}$ 、 $500 \mu\text{s}$ 。

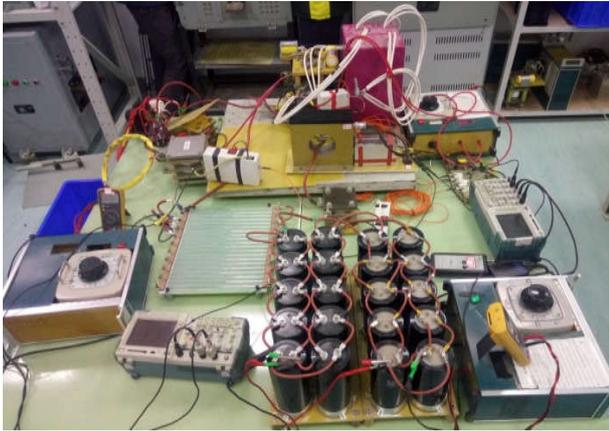


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

强迫换流实验电流波形如图 7 所示。触头燃弧时间为 204  $\mu\text{s}$ ，反向脉冲电流初始上升率为 240  $\text{A}/\mu\text{s}$ 。通过前期触头燃弧部分换流和辅助换流支路强迫换流的方法，在 38  $\mu\text{s}$  内完成了上升率为 20.4  $\text{A}/\mu\text{s}$  的 7 680 A 的短路电流的换流，将实验所得波形与仿真所得波形分析比对，两者基本吻合，证明了仿真的准确性，得到的辅助换流支路参数符合要求，在低能量、小型化的要求下，强迫换流方法可用于大电流快速换流。

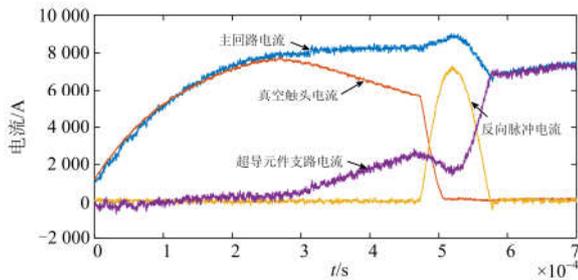


图 7 强迫换流实验电流波形

Fig. 7 Current waveform of forced commutation

## 4 结论

1) 提出了一种直流混合型超导限流器的方案，将限流器的额定通流与故障限流功能分开处理，高速真空开关承担额定通流功能使得通流容量大；超导元件只承担限流功能，其两端引线的截面积大大减小使传导的热量也减小，这就使得超导限流器的制冷功耗降低和装置体积大为减小。

2) 对限流器限流过程的三个阶段进行了分析，基于此确定了用于上升率为 20  $\text{A}/\mu\text{s}$  的 8 kA 短路电流的直流混合型超导限流器的辅助换流支路参数。

3) 设计了强迫换流实验，成功地在 38  $\mu\text{s}$  内完

成了上升率为 20.4  $\text{A}/\mu\text{s}$  的 7 680 A 的短路电流的换流，证明强迫换流的方法能够实现短路电流的快速换流，验证了方案的可行性。

## 参考文献

- [1] 马伟明. 舰船动力发展的方向——综合电力系统[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(6): 1-5.  
MA Weiming. Integrated power systems—trend of ship power development[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14(6): 1-5.
- [2] DOERRY N, FIREMAN H. Designing all electric ships[C] // Proceedings of the Ninth International Marine Design Conference, May 16-19, 2006, Ann Arbor, Michigan: 475-498.
- [3] 马伟明, 胡安, 袁立军. 十二相同步发电机整流系统直流侧突然短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 31-36.  
MA Weiming, HU An, YUAN Lijun. Sudden DC-side short circuit of a 12-phase synchronous generator-rectifier system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 31-36.
- [4] 庄劲武, 张晓峰, 杨锋, 等. 船舶直流电网短路限流装置的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 26-30.  
ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, YANG Feng, et al. Analysis and design of fault current limiter for ship DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 26-30.
- [5] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 21-26.  
XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 21-26.
- [6] 涂春鸣, 邓树, 郭成, 等. 新型多功能固态限流器对 0° 接线方式的影响及其解决办法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 81-86.  
TU Chunming, DENG Shu, GUO Cheng, et al. Impact of multi-function solid state fault current limiter on 0° wiring mode and its solution method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 81-86.
- [7] 孙曙光, 杜太行, 王景芹, 等. 一种新型的断路器瞬动校验选相合闸方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 125-132.  
SUN Shuguang, DU Taihang, WANG Jingqin, et al.

- Research of a new method for circuit breaker instantaneous validation phase selection[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(17): 125-132.
- [8] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [9] 王晨, 陈磊, 唐跃进, 等. 直流超导故障限流器方案设计及其限流效果仿真分析[J]. *继电器*, 2005, 33(6): 6-8.  
WANG Chen, CHEN Lei, TANG Yuejin, et al. Scheme design and simulation analysis of limiting effect on DC superconducting fault current limiter[J]. *Relay*, 2005, 33(6): 6-8.
- [10] 马幼捷, 王辉, 周雪松, 等. 超导故障限流器的研究现状及其应用[J]. *低温与超导*, 2007, 35(4): 304-307.  
MA Youjie, WANG Hui, ZHOU Xuesong, et al. The research situation and application of superconducting fault current limiters[J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2007, 35(4): 304-307.
- [11] 褚建峰, 王曙鸿, 邱捷, 等. 新型桥式高温超导故障限流器的设计[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(10): 99-104.  
CHU Jianfeng, WANG Shuhong, QIU Jie, et al. Design for new bridge high temperature superconducting fault current limiter[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(10): 99-104.
- [12] CUI J B, SHU B, TIAN B, et al. Safety considerations in the design, fabrication, testing, and operation of the DC bias coil of a saturated iron-core superconducting fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 5600704-5600704.
- [13] 胡南南, 唐跃进, 宋萌, 等. 高温超导磁体液氮零蒸发冷却系统设计及性能试验[J]. *低温技术*, 2014, 42(2): 5-9.  
HU Nannan, TANG Yuejin, SONG Meng, et al. Design and performance test of the liquid nitrogen zero boil-off cooling system for HTS magnets[J]. *Cryogenics*, 2014, 42(2): 5-9.
- [14] 徐国顺, 江壮贤, 庄劲武, 等. 新型真空直流限流断路器设计及其介质恢复特性[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(2): 171-177.  
XU Guoshun, JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, et al. A new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(2): 171-177.
- [15] 吴迪, 方伟, 徐国顺, 等. CuWC与CuCr50材料触头强迫关断在不同条件下的介质恢复特性对比分析[J]. *海军工程大学学报*, 2016, 28(6): 49-54.  
WU Di, FANG Wei, XU Guoshun, et al. Media recovery feature comparison of CuWC and CuCr50 interrupter under different forced shutdown conditions[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2016, 28(6): 49-54.
- [16] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 157-169.  
ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 157-169.
- [17] 刘亚丽, 周昀, 王少荣. 配电网继电保护一二次联合数字仿真系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 124-129.  
LIU Yali, ZHOU Jun, WANG Shaorong. Research on the primary and secondary combined digital simulation system of distribution network relay protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 124-129.
- [18] 郭振威, 姚建刚, 康童, 等. 一种输电线路超高速方向保护方法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(22): 168-177.  
GUO Zhenwei, YAO Jiangan, KANG Tong, et al. A method for directional ultra-high-speed protection of transmission lines[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(22): 168-177.
- [19] 李兰芳, 马明, 盛超, 等. 基于旋转因子变换插值的电压闪变检测算法[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(22): 178-185.  
LI Lanfang, MA Ming, SHENG Chao, et al. The voltage flicker detection algorithm based on rotation factor transforming interpolation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(22): 178-185.

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-11-21

作者简介:

张谢天(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全运行; E-mail: 13407301739@163.com

庄劲武(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化与安全运行。E-mail: 13871161550@139.com

(编辑 葛艳娜)