

# 采用相控关合技术 限制背靠背换流站涌流的仿真研究

徐建源<sup>1</sup>, 庚振新<sup>1</sup>, 杨志勇<sup>1</sup>, 林莘<sup>1</sup>, 齐伟夫<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110078; 2. 沈阳供电公司, 辽宁省 沈阳市 110003)

## Simulative Research on Restricting Inrush Current of Back-to-Back Converter Station by Controlled Switching

XU Jian-yuan<sup>1</sup>, GENG Zhen-xin<sup>1</sup>, YANG Zhi-yong<sup>1</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>, QI Wei-fu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110078, Liaoning Province, China;  
2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110003, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** To eliminate the leakage and explosion of capacitors for filters of converter station, based on back-to-back converter station project and by use of ATP software, the feature of inrush current during the switching of AC filter banks at 220 kV side of converter station is analyzed, and inrush currents during the switching of different types of filter banks are calculated. Calculation results show that for SC type of filter the multiple of its inrush current can be restricted to the range specified in the standard by controlled switching technique; for HP12/24 and HP3 types of filter, the phase angle control technique can be not adopted due to their smaller inrush current. Considering the dispersivity of circuit breaker's acting time under its actuation, in order to restrict the multiple of switching inrush current less than the twentyfold specified in the standard, by means of the research on the circuit breakers with different rate of decrease of dielectric strength (RDDS), the influence of both RDDS and dispersivity of circuit breaker's switching-on time on the controlled switching phase angle of circuit breaker for the filter banks is revealed, it can be used as the foundation for the selection of controlled switching circuit breaker for filter banks of back-to-back converter station.

**KEY WORDS:** circuit breaker; controlled switching; inrush current; converter station; filter bank

**摘要:** 针对换流站滤波器电容器出现漏油与爆炸的现象, 结合背靠背换流站工程, 运用 ATP 软件, 分析换流站 220 kV 侧交流滤波器关合时的涌流特征, 计算不同类型滤波器关合

时的涌流。结果显示: 对于 SC 型滤波器, 使用相控关合技术可将其关合的涌流倍数限制在标准规定的范围内; 而对于 HP12/24 和 HP3 型滤波器, 其涌流值较小, 可不采用相角控制技术。考虑到断路器操作时的动作时间分散性, 为将合闸涌流倍数限制在标准规定的 20 倍以下, 对不同绝缘强度下降率(rate of decrease of dielectric strength, RDDS)的断路器进行研究, 得到了 RDDS 与断路器合闸时间分散性对滤波器断路器相控关合初相角的影响, 为背靠背换流站滤波器组相控关合断路器的选取提供了依据。

**关键词:** 断路器; 相控关合; 涌流; 换流站; 滤波器

## 0 引言

滤波器是换流站中应用最广泛的滤波与无功补偿装置, 用于提高功率因数、改善电压质量和降低电能损耗<sup>[1-6]</sup>。滤波器在关合时会出现涌流与过电压, 从而使换流站滤波器电容器发生漏油、爆炸、母线电压波动严重等事故<sup>[7]</sup>。

对于涌流的限制, 传统的解决方法是采用合闸电阻或电感、RC 吸收装置、并联阻尼装置和避雷器等来减小滤波器关合时的暂态冲击。近年来, 一种更经济有效的方法得到了应用, 即相控关合技术, 可以大大减小滤波器关合时的暂态过电压和涌流, 以及降低切除时的重击穿概率<sup>[8-18]</sup>。

按设计需要, 换流站滤波器应根据系统的功率因数情况处于自动投切的运行环境中, 且投切较为频繁。使用带有相控关合控制装置的断路器可以进行相控关合, 降低关合涌流与过电压, 将滤波器的涌流倍数限制在标准规定的范围内, 保证滤波器安全可靠地运行。

基金项目: 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(707018); 辽宁省教育厅优秀人才项目(2006R40); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(2008T134)。

### 1 背靠背换流站电气接线模型

某背靠背换流站一侧交流开关站电压等级为 220 kV，另一侧交流开关站电压等级为 330 kV，均采用单母线接线，分别通过一回线路与各自电网相连<sup>[19]</sup>。换流站电气主接线如图 1 所示。220 kV 和 330 kV 单母线上均并接有交流滤波器组、并联电容器组和电抗器组。

换流站正向和反向都能传输 360 MW 的额定功率，并具有 396 MW 的 2 h 过负荷能力，最小连续输送功率水平为 36 MW。当背靠背系统输送额定功率 360 MW 时，220 kV 侧换流器消耗的无功为 214 Mvar，滤波器分 7 组投入，每组容量为 36 Mvar。220 kV 侧滤波器类型与滤波器中各原件参数如图 2 和表 1 所示。

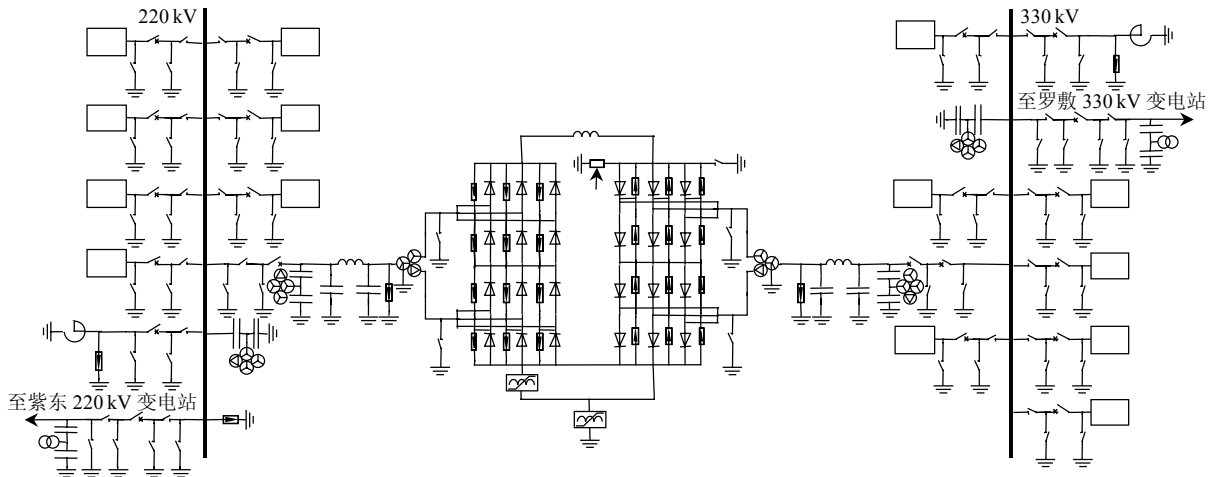


图 1 换流站电气主接线

Fig. 1 Main connection scheme of converter station

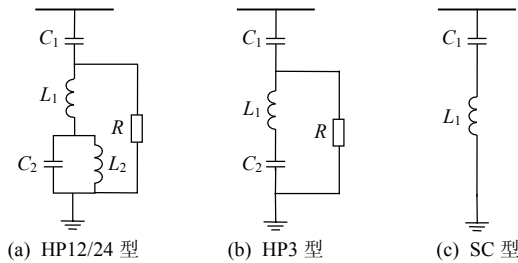


图 2 换流站滤波器类型

Fig. 2 Filter types of converter station

表 1 滤波器元件参数

Tab. 1 Components parameters of filter

元件参数	滤波器类型		
	HP12/24	HP3	SC
$C_1/\mu\text{F}$	2.154	2.166	2.166
$L_1/\text{mH}$	17.785	584.670	2.6
$C_2/\mu\text{F}$	4.015	17.330	—
$L_2/\text{mH}$	8.046	—	—
$R_1/\Omega$	380	1 500	—
调谐频率/Hz	600/1 200	150	—
三相无功/Mvar	36	36	36
分组数	3	2	2

## 2 滤波器投入仿真分析

### 2.1 滤波器投入方式

滤波器投入控制系统需要实时检测电网的功率因数。如果电网的功率因数低于设定值，则需

要向电网投入一定容量的滤波器；如果电网的功率因数高于设定值，则需要从电网中切除一部分滤波器<sup>[20]</sup>。

在实际运行中，只有 HP12/24 型和 HP3 型滤波器全部投入后才投入 SC 型滤波器；退出时则是 SC 型滤波器先退出。SC 型滤波器总运行时间比 HP12/24 型和 HP3 型滤波器少得多，但 SC 型滤波器处于频繁投切的状态<sup>[21]</sup>。换流器的无功与传输有功之间的关系及滤波器的投切情况如图 3 所示。

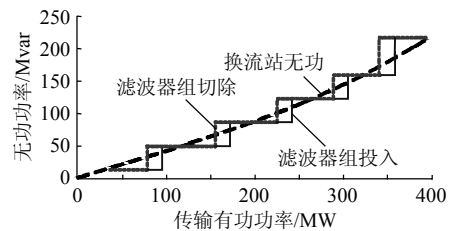


图 3 换流站无功投切情况

Fig. 3 Reactive power switching of converter station

### 2.2 滤波器投入涌流计算分析

根据换流站电气主接线以及滤波器的投切方式，选取 220 kV 侧滤波器组，采用 ATP 软件对系统传输有功为 36~396 MW 时的情况进行仿真分析，建立仿真模型如图 4 所示，图中 MOV 为金属氧化物避雷器。

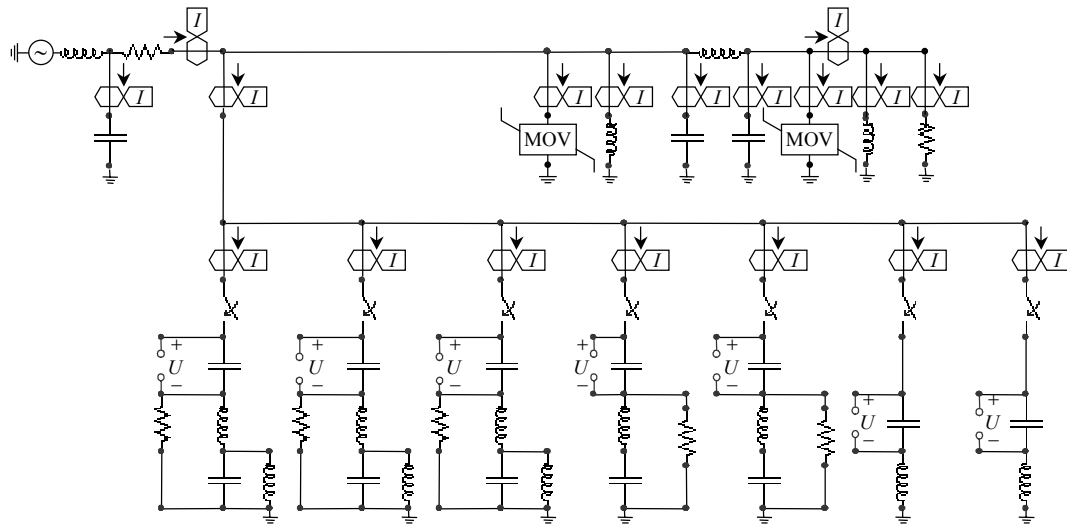


图4 ATP软件仿真模型

Fig. 4 Simulation model of ATP

首先，对 HP12/24 型滤波器的投入过程进行计算。设滤波器分 3 组投入，投入时刻为系统电压峰值，投入时间间隔 0.1 s，得到的计算结果如图 5 所示。对于类型相同的滤波器，涌流随投入组数的增加而增加，每投入一组涌流增加约 200 A。

对 HP3 型和 SC 型滤波器投入过程的分析与上述方法一致。结果表明，HP12/24 型和 HP3 型滤波器投入时最大涌流倍数分别为滤波器额定值的 12.5 倍与 3.8 倍，小于标准 GB50227—1995 的规定。而 SC 型滤波器第 1 组投入的涌流为额定值的 28 倍，高于标准中的规定值(标准中规定值为 20 倍的额定电流)。第 2 组 SC 型滤波器投入时的涌流波形与频谱图如图 6、7 所示。

第 2 组滤波器投入涌流为额定值的 39 倍，其

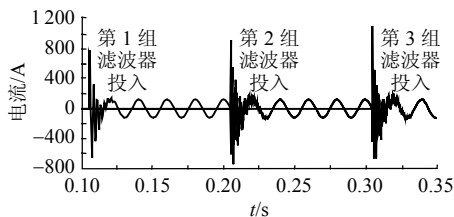


图5 HP12/24 型滤波器投入时的涌流波形  
Fig. 5 The inrush current waveform with HP12/24 type of filter switching in

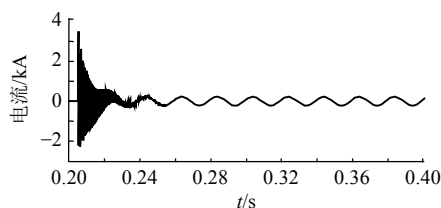


图6 第 2 组 SC 型滤波器涌流波形  
Fig. 6 Inrush current waveform of the second group SC type of filters

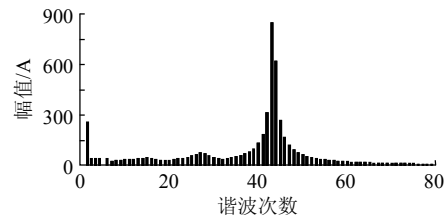


图7 第 2 组 SC 型滤波器涌流频谱  
Fig. 7 Inrush current frequency spectrum of the second group SC type of filters

中频率为 2 kHz 的成分幅值最大，达到 900 A。涌流中高幅值与高频率成分对电容器绝缘老化有重要影响，因此，对于操作频繁的滤波器需要采取抑制涌流的措施，提高电容器的寿命。

### 3 相控关合技术的应用

#### 3.1 相控关合相角的确定

由于 SC 型滤波器投入时，其涌流倍数已大于标准规定的范围，因此在分析中以 SC 型滤波器为对象，在不考虑断路器与击穿特性的情况下，分析不同合闸相角对 SC 型滤波器关合时涌流的影响。设系统电压为零时相角为 0°，电压为峰值时相角为 90°，得到 SC 型滤波器在不同相角关合时的涌流曲线，如图 8 所示。

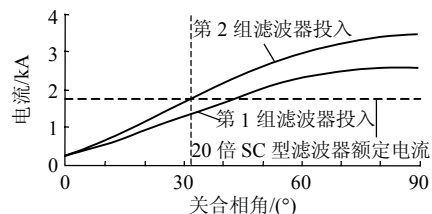


图8 SC 型滤波器投入时的涌流波形  
Fig. 8 The inrush current waveform with SC type of filter switching in

结果表明,当合闸相角小于 32°时,相控关合可以将 SC 型滤波器投入时的涌流限制在额定电流的 20 倍以下。因此,在不考虑断路器预击穿特性的条件下,可以确定相控关合的相角范围应为 [-32°, 32°],断路器关合时间偏差为 ±1.78 ms。

断路器相控关合不仅与关合的相角有关,而且与断路器的预击穿特性和合闸时间的分散性有关。图 9 为断路器预击穿特性。

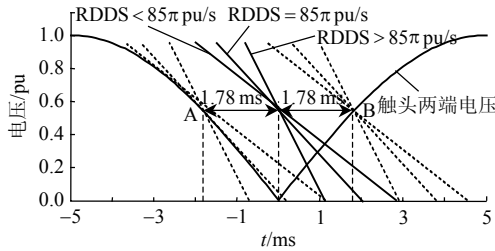


图 9 断路器预击穿特性

Fig. 9 Pre-breakdown characteristic of circuit breaker

断路器的预击穿电压与时间的关系可表示为一条直线,其斜率的绝对值称为触头间隙的绝缘强度下降率(rate of decrease of dielectric strength, RDDS)。图中断路器绝缘强度实线表示断路器断口间的耐压特性,两侧虚线为考虑到合闸时间偏差时的耐压特性边界线。其中与 A 点相切的断路器绝缘特性线的 RDDS 为 85π pu/s(48 kV/ms)。

当断路器 RDDS > 48 kV/ms 时,只要断路器关合时间分散性不大于 1.78 ms,即可实现相控关合,将涌流限制在标准规定的范围内,相应的目标合闸相角为

$$\theta = \frac{90 \sin(100\pi \Delta t)}{K \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \quad (1)$$

式中:θ 为目标合闸相角;Δt 为断路器合闸时间分散时间;K 为断路器绝缘强度下降率。

当Δt 为 1.78 ms 时,得到 RDDS 与断路器关合目标合闸相角之间的关系,如图 10 所示。

当断路器 RDDS < 48 kV/ms 时,满足相控关合的断路器最大时间分散可表示为

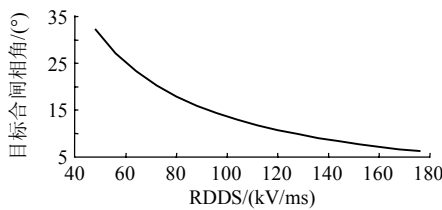


图 10 RDDS 与目标合闸相角的关系

Fig. 10 The relationship between RDDS and target switching-on phase angle

$$\Delta t_{\max} = \frac{(1.78 \times 10^{-3} - t)}{2} + \frac{0.53 - \sin(100\pi t)}{200\pi \cos(100\pi t)} \quad (2)$$

$$K = 100\pi \cos(100\pi t) \quad (3)$$

式中:Δt<sub>max</sub> 为断路器时间分散性最大值;t 为断路器绝缘强度曲线与触头两端电压相切的时间。

当绝缘强度曲线经过 B 点与触头两端电压负半轴曲线相切时,K 为最小值 13 kV/ms;K < 13 kV/ms 时,断路器 RDDS 与触头两端电压在 AB 区间没有交点,因此 K < 13 kV/ms 的断路器不能用于该换流站滤波器组相控关合;当 13 < K < 48 kV/ms 时,相控关合将换流站涌流限制在标准规定的范围内,相应的断路器合闸时间分散性与合闸相角范围如图 11 所示。

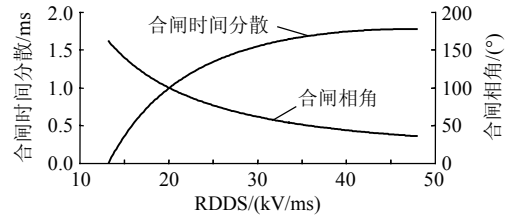


图 11 断路器合闸时间分散性与目标合闸相角  
Fig. 11 Time dispersion and target switching-on phase angle of circuit breaker

随着断路器 RDDS 的减小,要求断路器合闸时间分散性也减小,当 RDDS 为 13 kV/ms 时,要求断路器合闸分散性为零;因此,RDDS 不能选取得过小,否则对断路器合闸时间的分散性要求较高。

### 3.2 相控关合对电压的影响

相控关合不仅可以限制涌流,而且对滤波器电容器两端电压与母线电压波动有重要影响。第 2 组 SC 型滤波器在系统电压相角为 90°投入时,滤波器组电容器两端电压的峰值为 1.43 pu,母线电压波动为 0.45 pu。相应的电容器两端电压与母线电压如图 12 所示。

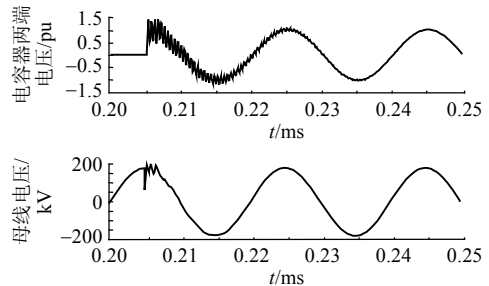


图 12 电容器两端电压与母线电压  
Fig. 12 Voltage of capacitor and bus

选取断路器  $RDDS > 48 \text{ kV/ms}$ , SC 型滤波器相控关合相角在  $[0^\circ, 32^\circ]$  内时, 得到 SC 型滤波器电容器两端电压及母线电压与关合相角之间的关系, 如图 13 所示。

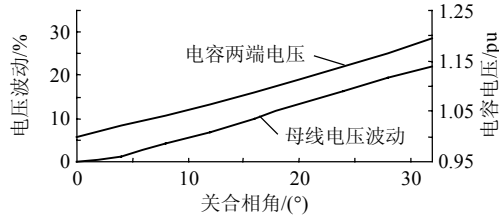


图 13 关合相角与电压关系曲线

Fig. 13 Relationship between switching-on phase angle and voltage

电容器两端电压与母线电压波动随关合相角的减小而减小。在相控关合的区间内, 电容器两端电压最大值为  $1.20 \text{ pu}$ , 母线电压波动最大值为  $0.22 \text{ pu}$ ; 在相角  $0^\circ$  关合时, 电容器两端无过电压, 母线也无电压波动。

在需要深度限制过电压幅值或对供电质量要求较高的场合, 可以按关合相角与电压的关系曲线选择适当的关合相角范围。

## 4 结论

通过对背靠背换流站滤波器关合时涌流与过电压的计算可知, HP12/24 型滤波器涌流随投入组数的增加而增加; 对于同类型的滤波器, 最后投入 SC 型滤波器关合时涌流最大, 超出标准规定的 20 倍范围。通过仿真计算得到, 相控关合技术可以有效限制滤波器投入过程中的涌流和过电压。结合断路器的预击穿特性可以得到应用相控关合技术限制关合涌流时对断路器动作时间分散性的要求指标。结果表明, 选择具有合适的  $RDDS$  和满足动作时间允许误差的断路器, 可以有效限制滤波器组合闸涌流, 并且满足标准中规定的要求。

## 参考文献

[1] 曹继丰, 罗培辉. 天广直流天生桥换流站交流滤波器运行状况分析[J]. 电力设备, 2004, 5(6): 18-20.  
Cao Jifeng, Luo Peihui. Operation condition analysis of AC filter for Tianshengqiao converter station of Tian-Guang HVDC[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(6): 18-20(in Chinese).

[2] 余建国, 杨明, 罗海云, 等. 天广直流输电工程换流站中新技术的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 52-54.  
Yu Jianguo, Yang Ming, Luo Haiyun, et al. Application of new technologies in converter stations of Tian-Guang HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 52-54(in

Chinese).

[3] 蔡希鹏.  $\pm 500 \text{ kV}$  天广直流输电系统交流滤波器频繁投切分析[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 1-3.  
Cai Xipeng. Analysis on frequent switching of AC filter in Tianguang HVDC project[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 1-3(in Chinese).

[4] 杨万开, 印永华, 王明新, 等. 灵宝背靠背直流工程换流站和系统调试总结[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 36-41.  
Yang Wankai, Yin Yonghua, Wang Mingxin, et al. Summary of converter station commissioning and system commissioning for Lingbao back to back HVDC project[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 36-41(in Chinese).

[5] 潘艳, 刘连光, 胡国新. 补偿电容器串联电抗对无源 LC 滤波器性能的影响[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 56-59.  
Pan Yan, Liu Lianguang, Hu Guoxin. Affection of compensating capacitor bank in series with reactor on performance of passive filter consisting of inductance and capacitance[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 56-59(in Chinese).

[6] 崔明德, 刘连光, 孙中明. 溪洛渡和向家坝特高压直流输电换流站接地极型式的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 17-20.  
Cui Mingde, Liu Lianguang, Sun Zhongming. Research on types of grounding poles for HVDC converter stations located in Xiluodu and Xiangjiaba[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 17-20(in Chinese).

[7] 肖遥. 广州换流站交流滤波器的设计问题及最佳配置方案探讨[J]. 电力设备, 2004, 5(11): 14-17.  
Xiao Yao. Discussion on design and optimal disposition scheme of AC filter for Guangzhou converter station[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(11): 14-17(in Chinese).

[8] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 143-152.

[9] 孙明灿, 林莘, 徐建源. 基于 DSP 无功补偿电容器组同步投切装置的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(4): 397-400.  
Sun Mingcan, Lin Xin, Xu Jianyuan. Research on DSP-based synchronous closing device for var compensation capacitors[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(4): 397-400(in Chinese).

[10] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 192-195.

[11] 张禹芳, 王培龙. 高压并联电容器组的合闸涌流计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 84-87.  
Zhang Yufang, Wang Peilong. A method to calculate close push current of high voltage shunt capacitor bank[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 84-87(in Chinese).

[12] 殷威扬, 刘宝宏, 马世英. 中俄背靠背换流站直流系统与静止无功补偿器的协调运行[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 57-62.  
Yin Weiyang, Liu Baohong, Ma Shiyong. Coordinated operation of HVDC/SVC in China-Russia back-to-back converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 57-62(in Chinese).

[13] 孙海峰, 刘磊, 崔翔. 高压直流换流站换流系统宽频建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 24-29.  
Sun Haifeng, Liu Lei, Cui Xiang. Wide-band modeling of converter systems in HVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 24-29(in Chinese).

[14] 杜忠明. 贵广第二回直流输电工程换流站无功补偿的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 69-74.

- Du Zhongming. Study on reactive power compensation for the secondary HVDC project from Guizhou to Guangdong[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 69-74(in Chinese).
- [15] 郑旭, 康健, 杜治. 智能合闸控制器的原理及其在江陵换流站的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 72-76.  
Zheng Xu, Kang Jian, Du Zhi. Working principle of controlled switcher with artificial intelligence technology and its application in Jiangling converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 72-76(in Chinese).
- [16] Brunke J H, Frohlich K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching-Part I: Theoretical considerations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 276-280.
- [17] 游一民, 陈德桂, 张银昌, 等. 真空断路器关合速度与预击穿对同步关合的影响研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 85-89.  
You Yimin, Chen Degui, Zhang Yinchang, et al. Study on the influence of the closing velocity and the pre-strike in synchronous closing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 85-89(in Chinese).
- [18] 李利. 配永磁机构真空断路器测控系统及其同步关合技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002.
- [19] 摆亲, 李安伟, 岳蕾. 灵宝换流站电容器故障处理方法[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 136-139.  
Bai Qin, Li Anwei, Yue Lei. Treatment methods of the malfunction of the capacitors in the converter station[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 136-139(in Chinese).
- [20] 朱韬析, 王超. 广州换流站交流滤波器运行中存在的问题[J]. 电力设备, 2007, 8(10): 66-68.  
Zhu Taoxi, Wang Chao. Existent problems in operation of AC filter in Guangzhou converter station[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(10): 66-68(in Chinese).
- [21] 苏炜. 直流输电换流站交流滤波器研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.



徐建源

收稿日期: 2009-07-14。

作者简介:

徐建源(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事配电系统自动化和高压电器理论等方面的科研和教学工作;

庚振新(1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压电器及电力系统过电压, E-mail: gzhxin07@163.com;

杨志勇(1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压断路器同步关合技术;

林莘(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术、高压电器、智能化电器等方面的教学和科研工作。

(责任编辑 沈杰)