

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.015

有利于多馈入系统恢复的自适应变结构VDCOL控制

胡松伶, 王渝红, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 针对多馈入直流系统故障后难以快速恢复的问题,提出了一种基于模糊理论,并融合多馈入直流特性的自适应变结构VDCOL控制策略。该控制方法将模糊控制的非线性特性与VDCOL控制机理有效结合,同时将多条直流自身的强度和相互作用考虑在内,根据电压大小及其恢复水平对直流电流进行动态控制,协调系统的电压和功率恢复。仿真结果表明:该控制方法能够有效控制恢复期间的无功需求,抑制后续换相失败发生,加快系统的恢复,保证系统的安全稳定运行。

关键词: 多馈入直流; 多馈入短路比; 模糊控制; 自适应变结构VDCOL; 协调恢复

Adaptive Variable Structure VDCOL Control Strategy for Coordinated Recovery of MIDC System

HU Songling, WANG Yuhong, LI Xingyuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: An adaptive variable structure VDCOL control strategy considering the characteristics of MIDC system based on fuzzy theory is proposed to improve the recovery performance of multi-infeed HVDC system after disturbance. This control combines nonlinear characteristics of fuzzy control with basic mechanism of VDCOL control effectively, and takes the own strength and interactions of multiple DC lines into account, which ensures each current order of MIDC system adjusted dynamically according to system voltage variation and recoveries voltage and power coordinately. The simulation results show that this method can decrease the reactive power demanded inhibit the follow-up commutation failures to accelerate the recovery and ensure the safe and stable of MIDC system.

Key words: multi-infeed HVDC; multi-infeed short circuit ratio; fuzzy control; adaptive variable structure VDCOL; coordinated recovery

0 引言

在含有多条直流的多馈入直流(multi-infeed direct current, MIDC)输电系统中,多个逆变站换流站之间存在耦合作用,当发生诸如换相失败等故障时,将造成直流电压的下降,若仍将直流功率控制在额定值,那么直流电流会上升,并且直流系统会对所连交流系统产生大量无功需求,可能会引发交流换相电压持续波动,严重时同时发生换相失败,系统难以恢复到稳定运行^[1-6]。

扰动发生后,如何快速有效地使直流系统恢复到正常稳定运行状态是一个重要问题。为此在直流控制系统中引入了依赖于电压的电流指令限制单元(voltage dependent current order limiter, VDCOL),在低电压时对直流电流指令进行限制,改善系统的恢复特性^[7-8]。文[9]探讨了抑制换相失败和后续换相失败的措施,但并未对各种措施进行深入研究。文[10]分析了VDCOL控制参数的变化对系统恢复的影响,但需多次试验得出最优值。文[11-12]通过在VDCOL后增加延时环节和最小选择单元改善系统渐变恢复特性,但没有考虑各电气量的动态特性。

收稿日期:2015-12-09; 修回日期:2016-01-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA05A119)。

Project Supported by National High-tech R & D Program of China(863 Program)(2011AA05A119).

文[13]设计了基于模糊控制的自适应 VDCOL 控制, 但忽略了多条直流系统之间的相互影响。

笔者考虑系统本身强度大小、多馈入直流输电系统间的相互作用和电压的动态变化, 提出一种自适应变规则 VDCOL 控制。其特点是, 利用非线性和鲁棒性高的模糊控制代替传统的 VDCOL 控制, 并添加多馈入短路比作为控制的参考量, 动态地协调多馈入系统的恢复。

1 VDCOL 原理

根据测量环节监测信号的不同, VDCOL 控制主要分为两种基本类型, 即依赖交流电压的 AC-VDCOL 和依赖直流电压的 DC-VDCOL^[14]。这两种控制方法均在电压跌落到某个阈值时对直流电流进行限制, 在系统故障或恢复过程中大幅缓解逆变站对交流系统的无功需求, 但 AC-VDCOL 只能检测交流故障时引起的电压跌落, 而 DC-VDCOL 在交流和直流故障时, 均能有良好效果。目前国内外已投运的直流工程只有美国太平洋使用 AC-VDCOL 控制, 其余的基本都采用 DC-VDCOL 控制^[15]。常规 VDCOL 控制的基本原理和特性曲线见图 1。

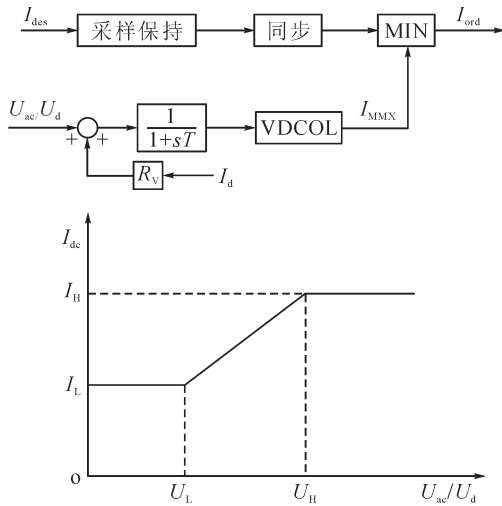


图 1 典型 VDCOL 特性

Fig. 1 Typical VDCOL characteristics

由图 1 可知, 通过 VDCOL 控制输出的控制量与 U_H 、 U_L 、 I_H 、 I_L 4 个参数有关, 通过调整参数的不同会使得直流系统有不同的控制特性: 当 U_H 和 U_L 增大, 或者 I_L 和 I_H 减小时, 在相同启动电压情况下, 直流电流的控制值将会更小, 有利于降低动态过程中系统所需无功功率, 从而使得交流母线的电压恢复更快, 但直流传输功率的降低, 不利于功角稳定; 反之, 当 U_H 和 U_L 减小, 或者 I_L 和 I_H 增大时, 有利于功率恢复, 但不利于电压稳定。因此根据系统动态特

性对 VDCOL 的参数进行修正, 可以协调故障后的恢复, 更好地保证系统稳定运行。

但是常规的 VDCOL 控制在检测到电压下降后的动作曲线是固定的, 并没有考虑无功功率需求、所连交流系统强弱、电压变化动态特征以及多馈入直流系统间相互作用等因素。因此基于这几个方面对 VDCOL 控制进行优化是非常有必要的。

2 短路比和多馈入短路比

单条直流输电系统中交、直流间的相互作用很大程度上取决于交、直流间所传输容量的大小, 具体表现在: 系统的机械惯性或转动惯量、接入点交流系统的等值阻抗。一般采用短路比(short circuit ratio, SCR)来衡量系统的强弱, 其定义为

$$SCR = \frac{S_{ac}}{P_{dN}} = \frac{1}{Z_{pu}} \quad (1)$$

式(1)中: S_{ac} 为换流母线的短路容量; P_{dN} 为直流线路额定功率; Z_{pu} 为交流系统的等值阻抗。即交流系统的等值阻抗越小, 短路比越大, 交流系统的支撑作用较强, 电网的强度越大。

当多条直流受端相连时, 系统的恢复应考虑它们之间的相互作用, 若采用短路比概念评估交直流系统会存在较大偏差。因此 CIGRE 工作组提出了多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MSCR)。当功率基准比和电压标么化后, 可表示为

$$K_{MSCRi} = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{1}{P_{PBRi}} \cdot \frac{1}{Z_{eqi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n Z_{eqij}} \quad (2)$$

式(2)中: i 是直流回路的编号; S_{ac} 为换流母线的短路容量; P_{deqi} 为考虑其他直流回路影响后的等值直流功率; $P_{PBRi} = P_{dNi} / P_{dNy}$ 为选定 j 回直流功率为基准值后的子系统 i 基准功率比; Z_{eqi} 为 i 回直流交流系统等值阻抗; Z_{eqij} 为与子系统 i 耦合的其他交流系统总等值互阻抗。文[16]通过 PQ 解耦法分析计算得到多馈入短路比可以表示为

$$K_{MSCRi} = \frac{1}{P_{PBRi}} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i}} \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta U_j / \Delta U_i$ 即为表示多条直流间相互作用的多馈入交互作用因子, 因此多馈入短路比能够很好地表明多馈入系统自身强度大小以及相互作用强度的大小。

三馈入直流输电模型见图 2。

对图 2 所示三馈入系统有:

$$Z_{eq11} = Z_1 / \left[\frac{Z_{12}Z_{13}}{Z} + \left(\frac{Z_{21}Z_{23}}{Z} + Z_2 \right) / \left(\frac{Z_{31}Z_{32}}{Z} + Z_3 \right) \right]; \quad (4)$$

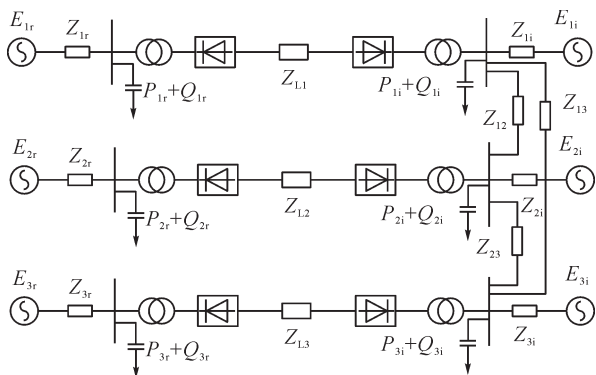


图 2 三馈入直流输电模型

Fig. 2 Model of triple-infeed DC system

$$Z_{\text{eq}12} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{12}}; \quad (5)$$

$$Z_{eq13} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3 + Z_{13}} \quad (6)$$

式(4)-(6)中, $Z=Z_{12}+Z_{13}+Z_{23}$, 如果子系统 1 与其他两回直流距离很远, 即 $Z_{12} \rightarrow \infty, Z_{13} \rightarrow \infty$, 那么

$$K_{MSCR1} = \lim_{Z_{I2}, Z_{I3} \rightarrow \infty} \frac{1}{Z_{expi} + \sum_{j=1, j \neq i}^n Z_{expj}} = Z_{I1} = SCR_{I10} \quad (7)$$

由此可见,单馈入的短路比只是多馈入短路比的一种特殊形式,因此直流输电系统交流系统强弱均可由多馈入短路比进行计算。对于多馈入直流系统,故障发生后,若同时快速地恢复功率,会导致大量的无功需求,可能造成后续换相失败的发生。而多馈入短路比能够很好地衡量多条直流间自身及相互作用强度,因此可以根据多馈入短路比的大小调整各条直流电压和功率恢复的先后顺序,多馈入短路比越大,后续换相失败风险越低,系统的电压稳定能力越强^[17]。因此对于直流输电系统故障后的恢复,当 K_{MSCR} 较小时,应当首先恢复电压;当 K_{MSCR} 较大时,可以考虑优先恢复功率。

3 模糊控制的建立

为了动态监测电压的变化,引入模糊控制。传统的控制需要知道被控对象的精确数学模型,而电力系统是个非线性系统,并且直流系统相互作用影响比较复杂,描述精确的数学模型比较困难,模糊控制却不需要知道被控对象精确的数学模型,是一种非线性控制器,设计过程简单、鲁棒性强,因此适用于直流输电系统。模糊 VDCOL 控制的基本理论是动态监测直流电压的变化以及直流电压变化的速率,从而通过设定的精确规则控制直流电流,减小故障时对系统的影响,加快故障后的恢复。

模糊控制器一般由输入变量模糊化、知识库、

模糊推理、输出变量清晰化 4 部分组成^[18-19]。

3.1 输入变量的选取

传统 VDCOL 控制, 根据直流电压的变化控制直流电流的大小, 因此将直流电压实测值与额定值的差值 ΔU_d 和差值变化率 $\Delta \dot{U}_d$ 设为输入变量, 直流电流的增量 ΔI_d 设为输出变量。但传统 VDCOL 控制忽略了恢复期间交流系统的强弱以及多条直流间的相互作用对功角稳定和电压稳定的影响。因此将衡量多馈入系统强弱的因子—— K_{MSCR} 考虑到模糊控制的输入之中。根据上文所知, K_{MSCR} 较小时, 应优先考虑电压的恢复, 即将 U_H 和 U_L 增大, 此时直流电压差值增加; 当 K_{MSCR} 较大时, 直流电压的差值应减小。所以对于多馈入系统, 模糊控制的输入量 ΔU_d 可以变为

$$\Delta U_i = U_{0i} - U_{di} + C_{0i} - k_i \cdot K_{MSCRi} \quad (8)$$

式(8)中: U_{ik} 为第*i*回直流的直流电压实测值; U_{ik} 为*i*回直流电压实测值; k_i 为比例因子; C_{ik} 是一个常数,数值设为*i*回线路交流系统不强不弱(文中取 $SCR=3$)且与其他直流相互作用为0时,模糊VDCOL与传统VDCOL控制曲线重合,因此有

$$C_0 = k_i \cdot K_{MSCBi} = 3k_o \quad (9)$$

为了获得 k_i 的最优大小, 采用 PSCAD 程序 Optimum Run 模块中的 SIMPLEX 算法进行优化计算, 从而使得系统的协调恢复更加可靠。优化的目标函数取为

$$f=\min J=\int [\omega(I_{\text{dref}}-I_{\text{d}})^2+\xi(U_{\text{ac}}-0.9U_{\text{acN}})^2]tdt_{\circ} \quad (10)$$

式(10)中: I_{dref} 、 I_{d} 分别为直流电流的参考值和实测值; U_{ac} 、 U_{acN} 为交流电压的实测值和额定值; ω 、 ξ 为权系数,文中均取为0.5。经过优化计算 C_0 取为1.5。

因此改进后的模糊 VDCOL 控制的动态曲线见图 3,该改进特性曲线的特性是:根据交流系统强度和相邻系统的影响,确定应当优先恢复功率还是电压,从而调整 VDCOL 的控制曲线,并使用模糊控制控制该曲线,利用模糊控制的非线性和鲁棒特性动态监测控制量,协调控制多馈入系统的恢复。

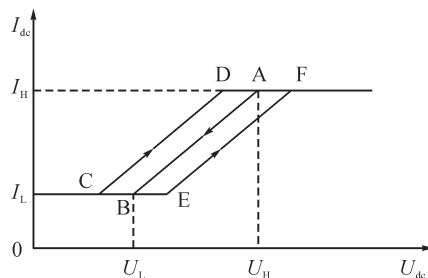


图 3 改进的 VDCOL 控制曲线

Fig. 3 Improved VDCOL control curve

当需要优先恢复功率时,恢复曲线左移,按照 ABCD 控制曲线动态控制系统;当需要优先恢复电压时,恢复曲线右移,按照 ABEF 曲线动态控制系统。

3.2 确定论域和隶属函数

通过为输入输出变量选定合适的量化因子和比例因子,将差值的模糊论域均设为 $[0, 6]$,差值变化率的模糊论域设为 $[-6, 6]$,模糊子集分别记为 $\{E$ (零), S (小), M (中), B (大) $\}$, $\{NB$ (负大), NM (负中), NS (负小), ZE (零), PS (正小), PM (正中), PB (正大) $\}$ 。使用三角形隶属函数,可以得到隶属度函数见图 4。

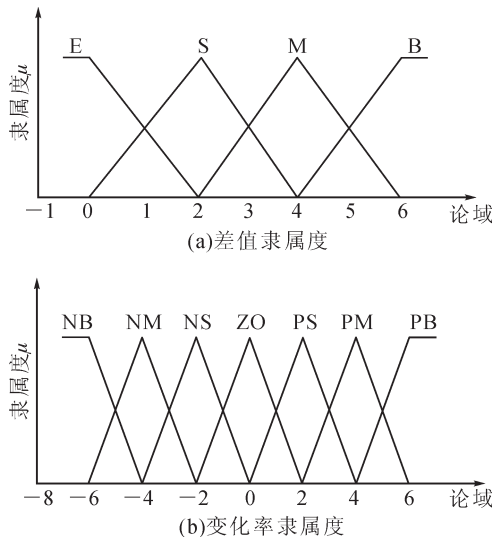


图 4 模糊量的隶属函数

Fig. 4 The fuzzy membership function

3.3 控制规则

模糊 VDCOL 控制规则见图 5。

$\Delta I_d \backslash \Delta U$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E							
S	M	S		E		S	
M		M					M
B	E		S				

图 5 模糊 VDCOL 控制规则

Fig. 5 Control rules for fuzzy-VDCOL

模糊控制的核心是模糊规则的制定,由输入—输出对产生一条控制规则,采用连接词为“and”的逻辑运算,运算规则可表示为

If ΔU is A and ΔU is B , then ΔI_d is C . (11)

式(11)中, A 、 B 、 C 分别为输出量和输出量模糊子集中的元素。变规则 Fuzzy-VDCOL 动态监测直流电压,控制直流电流的输出取决于电压的变化量和速率:当电压变化较大时,无论变化率为多少,都应动态控制直流电流减小;当电压变化适中,而变化率较大时,也应减小直流电流;具体的控制规则

由图 5 给出,总共应有 $4 \times 7 = 28$ 条控制规则。

3.4 解模糊

经由控制得到的模糊输出量通过解模糊计算和比例转换后得到实际的控制量。文中采用重心法进行解模糊,基本计算方法为

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (12)$$

式(12)中: z_0 为输出的精确量; z_i 为输出论域内的第 i 个元素; $\mu(z_i)$ 为 z_i 对应的隶属度值。

4 仿真分析

基于 PSCAD 中的 CIGRE 标准模型,建立了典型的三馈入直流输电系统,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制,受端系统通过耦合阻抗连接在一起。各条直流逆变侧交流系统等值阻抗为 $Z_1 = 5.49 + j20.46 \Omega$, $Z_2 = 5.57 + j8.99 \Omega$, $Z_3 = 5.21 + j16.846 \Omega$ 。系统间的耦合阻抗分别为 $Z_{12} = 7.5 + j70.2 \Omega$, $Z_{13} = 1.22 + j21.98 \Omega$, $Z_{23} = 5.43 + j78.5 \Omega$ 。对三馈入系统进行优化计算,得到各数据见表 1。在逆变侧分别采用传统控制和改进控制进行仿真,仿真时间为 2 s,在 1 s 时逆变侧交流母线发生三相接地故障,故障持续时间为 0.1 s,笔者以熄弧角小于 10° 为换相失败判据,仿真结果见图 6。

表 1 计算和优化数值

直流系统	传统短路比	多馈入短路比	比例系数
1	2.50	2.75	0.53
2	5.00	4.18	0.38
3	3.00	2.85	0.52

从图 6 可以看出,在传统控制方式下,当 1 s 发生故障时,3 条线路均会发生换相失败,但子系统 2、3 熄弧角很快恢复,故障切除后子系统 1 熄弧角也能立即恢复,但由于 3 条子系统间的相互作用及子系统本身的强度大小,3 个子系统均会在恢复过程中发生扰动,并且子系统 1、3 扰动较大,分别在 1.16 s 和 1.17 s 再次发生换相失败,无功功率的需求也再次增加,进一步延迟系统的恢复,大约 1.8 s 系统才能再次恢复到稳定运行。而采用自适应变结构 VDCOL 控制后的系统,均不会在恢复过程中再次发生换相失败,无功功率需求不会增加,系统恢复特性得到很好改善。对于子系统 2,多馈入短路比较大,是一个强系统,因此电压支撑能力较高,传统控制下,故障后电压并不会再次降低,因此自适应

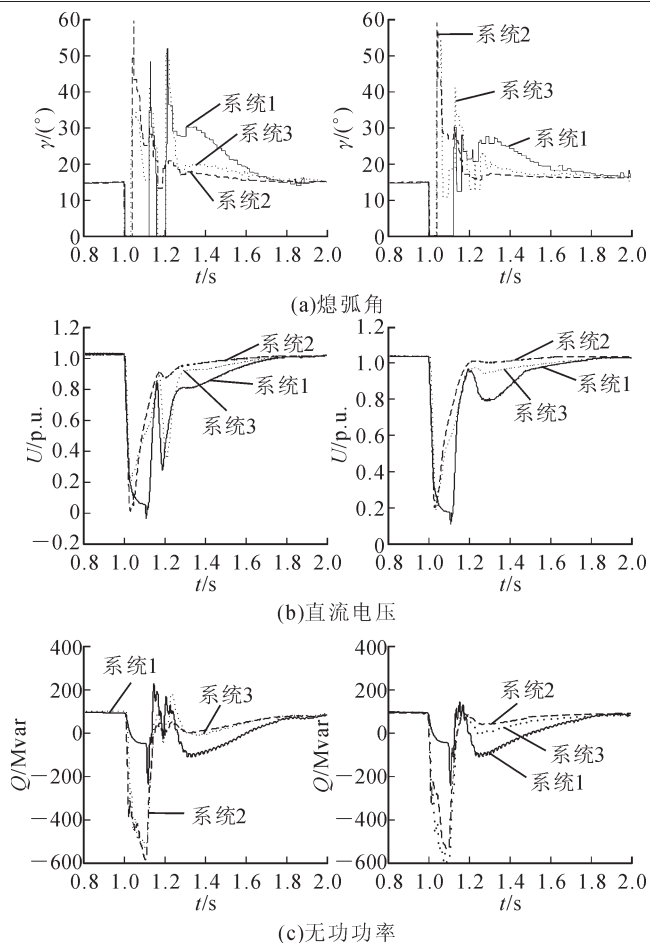


图6 三馈入系统各量的响应特性曲线
Fig. 6 The response curve of volume for triple-infeed system

变结构 VDCOL 控制子系统 2 快速恢复功率,在 1.41 s 恢复稳定,比传统控制快了 0.39 s。对于子系统 1 和 3,由于多馈入短路比较小,是弱系统,在传统控制方式下电压均会再次波动,因此协调自适应结构 VDCOL 控制首先恢复电压,故障切除后系统电压上升较快,电压的变化率较大,限制直流电流较为严格,减缓电流的增加,使系统更加平稳,防止较大的波动,分别在 1.7 s 和 1.46 s 恢复到稳定运行,比传统控制快了 0.1 s 和 0.34 s。自适应变结构 VDCOL 控制效果良好,3 条线路并没有同时快速恢复功率给系统恢复带来更大负担,除故障系统,其余系统均比传统控制下恢复快得多,故障系统恢复也快于传统控制,保证了多馈入系统的快速协调恢复。

5 结语

笔者针对多馈入直流输电系统故障后的恢复问题,基于模糊控制理论,提出了一种协调控制策略,将多条直流间的相互作用和自身强度考虑在内,根据系统电压水平和电压的恢复水平动态地控

制直流电流,协调多馈入系统间的恢复,消除暂态过程中各条直流线路间的不良影响。仿真结果表明,自适应变结构 VDCOL 具有很好的控制特性,有效地抑制了后续换相失败,加快了系统的协调恢复。同时,文中所提出的控制策略也需更多的实例去验证。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] ZHOU Changchun, XU Zheng. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system[C]//Proceedings of International on Power System Technology. Kunming:IEEE/PES, 2002:2462-2466.
- [3] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京:电力工业出版社,1985.
- [4] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术,2008,32(11):7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11):7-12.
- [5] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术,1998,22(2):16-19.
XU Zheng. AC/DC and DC/DC Interactions of multiple HVDC links terminating[J]. Power System Technology, 1998, 22(2):16-19.
- [6] DENIS L H A, ANDERSON G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 13(3):923-931.
- [7] KUNDUR P K. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] WEYRICH K, LEELARUJI R, KUEHN W. Real-time implementation of an automatic voltage stabilizer for HVDC control[C]//2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe(ISGT Europe). Berlin:IEEE, 2012:1-8.
- [9] 林凌雪,张尧,钟庆,等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术,2006,30(17):40-46.
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17):40-46.
- [10] 张建设,张尧,张志朝,等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术,2005,29(5):20-24.
ZHANG Jianshe, ZHANG Yao, ZHANG Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5):20-24.
- [11] 汪娟娟,张尧,林凌雪. 交流故障后 MIDC 系统的协调

- 恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 79-83.
- WANG Juanjuan, ZHANG Yao, LIN Lingxue. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 79-83.
- [12] 郭利娜, 刘天琪, 李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 95-99.
- GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 95-99.
- [13] YANG Dachun, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Study of an adaptive VDCOL control strategy for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia-Pacific: [s.n.], 2010: 1-4.
- [14] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] BUNCH R, KOSTEREV D. Design and implementation of AC voltage dependent current order limiter at pacific HVDC intertie[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 293-299.
- [16] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
- LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [17] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等. 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 20-25.
- LIU Jian, LI Xingyuan, FU Xiaotao, et al. Relationship of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 20-25.
- [18] 章卫国, 杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
- [19] 李士勇. 模糊控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- 胡松伶(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。
- 王渝红(1971—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电(通信作者)。

(上接第 89 页)

- [17] 焦立阳. 电力变压器绕组短路电动力计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- JIAO Liyang. Calculation on the windings short-circuit electromagnetic force in power transformers[D]. Shenyang: Shenyang Polytechnic University, 2009.
- [18] GB 1094.5—2008 电力变压器第五部分: 承受短路的能力[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- GB 1094.5—2008 Power transformers-Part 5: Ability to withstand short circuit[S]. Beijing: China Standardization Press, 2008.
- [19] GB/T 15544—1995 三相交流系统短路电流计算[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- GB/T 15544—1995 Short-circuit current calculation in three-phase AC systems[S]. Beijing: China Standardization Press, 2008.
- [20] 梁振光, 唐任远. 大型电力变压器绕组的短路强度问题[J]. 变压器, 2003, 40(8): 9-12.
- LIANG Zhenguang, TANG Renyuan. Short-circuit strength of large power transformer windings[J]. Transformer, 2003, 40(8): 9-12.
- [21] JIAO Liyang, DONG Bao, LI Hongyou. The calculation of ampere force on electric power transformer under the short circuit situation[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2009: 4423-4426.
- 徐肖伟(1983—), 男, 工程师, 工学硕士, 研究方向为高电压试验技术、变压器状态评估。