抑制多馈人直流输电系统后续换相失败措施研究

郭利娜,刘天琪,李兴源

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:针对多馈入直流系统中发生的后续换相失败问题,以换相失败的本质为理论依据,在搭建仿真模型的 基础上验证了静止无功补偿器(SVC)在抑制后续换相失败中的作用,同时提出一种有效抑制后续换相失败的 变熄弧角控制方式。通过分析变熄弧角控制方式的应用缺陷,进一步提出一种基于渐变恢复理论的新型动态 低压限流环节(VDCOL)控制方式。该控制通过动态 VDCOL 延缓单条直流功率恢复速率,可降低故障期间直 流系统对交流系统的无功需求,同时其延时环节也可消除暂态过程中各条直流线路间的不良交互影响,以达到 多条直流交替恢复、有效抑制后续换相失败的目的。仿真算例结果验证了控制方法的有效性。

关键词:多馈入直流;高压直流输电:后续换相失败;熄弧角控制;渐变恢复;模型 中图分类号: TM 721.1

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.017

引言 0

换相失败是采用晶闸管作换流阀元件的直流系 统面临的常见故障之一,其危害主要体现在其导致 直流电压下降的同时还会增大直流电流。换相失败 发生后,若采取的控制措施不当,很可能引发后续换 相失败,严重时将导致传输功率中断,使整个系统失 稳。对于多馈入直流输电系统,多个换流站相继发生 连续换相失败对受端的影响更是难以想象的[1]。因 此,采用适当的控制策略抑制多馈入直流输电系统 后续换相失败已成为当前直流输电领域中亟待研究 的问题[24]。

目前,已有学者对换相失败的影响因素和抑制 措施进行了研究。文献[5]总结了抑制换相失败和后 续换相失败的7种措施,但并未针对每种措施进行 深入的研究和验证。文献「6-8]从协调控制、低压限 流环节(VDCOL)控制、熄弧角渐变控制3个层面,对 抑制换相失败的措施进行了阐述,但都是从单独的 角度探讨抑制换相失败的控制策略,并未分析各种 控制方式的优缺点。值得注意的是,对多馈入直流 系统换相失败的研究发现,多回直流系统之间可能 存在不良的相互作用,使得故障后直流功率很难快 速恢复从而引发后续换相失败[9-10]。因此,本文基于 多馈入直流系统模型,在系统发生三相短路故障情 况下,对文中提出的抑制多馈入直流系统后续换相

收稿日期:2012-10-10:修回日期:2013-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51037003);国家高技 术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A119);国家 电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG027-2012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51037003), National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A119) and Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG027-2012)

失败的3种典型有效措施进行了比较和研究。

多馈入直流系统模型 1

首先,在PSCAD 中建立典型三馈入系统如图1 所示。3条直流线路均是在 CIGRE 标准模型基础之 上建立的,此系统可以看作是由实际复杂电力系统 抽象得到的简化模型。将各条直流线路的换流母线 通过耦合阻抗相联结,分别设置:Z12=1.214+j31.415 $\Omega, Z_{13}=3.200+i76.930\Omega, Z_{23}=5.421+i78.814\Omega_{\odot}$ 故障 为1s时直流系统1逆变侧母线发生三相短路故障, 故障持续 0.1 s 后切除,总仿真时间为 2 s,考虑到串 联元件的误差,本文认为熄弧角小于10°时系统就 已发生换相失败。



Fig.1 Model of multi-infeed HVDC system

2 SVC 抑制后续换相失败的研究

2.1 SVC 模型

直流输电系统运行时,需要消耗大量的无功功 率,发生故障时,逆变侧的无功功率需求将会更大, 此时与系统并联的静止无功补偿器(SVC)可以通过 快速交换无功功率,为系统提供无功支撑,减少直流 系统后续换相失败发生的几率[11-12]。

文中用到的 SVC 属于晶闸管投切电容器--晶闸 管控制电抗器(TSC-TCR)型。它由 1 条 TCR 支路和 1 组 TSC 支路构成^[13]。TSC 在接通期间,向系统注入 的无功功率为:

$$Q_c = \omega C U_{\rm S}^2 = \frac{U_{\rm S}^2}{X_c} \tag{1}$$

其中,C为电容器电容; U_s 为 TSC 的端电压; X_c 为等 效容抗,其值为 $1/(\omega C)_o$

而 TCR 从系统中吸收的无功功率为:

$$Q_{L} = \frac{U_{\rm S}^{2}}{X_{L}(\alpha)} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_{L}} U_{\rm S}^{2}$$
(2)

由式(1)和式(2)可得 SVC 注入电力系统无功 功率表达式为:

 $Q_{\text{svc}} = Q_c - Q_L = \left[\frac{1}{X_c} - \frac{2\pi - 2\alpha - \sin(2\pi - 2\alpha)}{\pi X_L} \right] U_s^2 (3)$ 其中, X_L 为基波电抗, 其值为 ωL ; α 为晶闸管触发延 迟角。

SVC 的控制采用积分器控制模型,如图2所示。



图 2 SVC 控制模型原理图

Fig.2 Schematic diagram of SVC control model 其控制算法为:

$$B_{\rm SVS} = \left(\frac{K_{\rm I}}{s} + K_{\rm P}\right) \left(\Delta U - K_{\rm SL} I_{\rm SVC}\right) \tag{4}$$

其中, K_{P} 、 K_{I} 为比例积分(PI)控制器的比例、积分系数; I_{SVC} 为实现有差调节的电流反馈信号;反馈系数 K_{SL} 取值通常在3%~5%之间,本文取0.03; ΔU 为SVC端口电压参考值 U_{ref} 与实际值 U_{pu} 的差值。

2.2 SVC 抑制后续换相失败仿真分析

在 HVDC2 逆变侧加装容量为 100 Mvar 的 SVC, 加装前后 HVDC2 逆变侧熄弧角 γ 变化如图 3 所示。



图 3 加装 SVC 前后熄弧角对比图 Fig.3 Comparison of extinction angles between controls with and without SVC

由仿真波形可以看出,当 HVDC1 处发生三相短路故障后,由于多馈入直流系统间各支路换流站之间的交互影响,HVDC2 线路将会发生后续换相失败,熄弧角在 1.2 s 时再次下降到 0°,而加装一定容量的无功补偿装置,可明显改善 HVDC2 线路熄弧角

的恢复特性,缩短熄弧角恢复时间,有效抑制线路后 续换相失败的发生。但在实际工程中,SVC 高昂的价 格制约了该方式在多馈入直流系统中的广泛应用, 为此,本文在不增加工程成本的情况下,提出了变熄 弧角控制和基于渐变恢复策略的动态 VDCOL 控制 2 种改进控制方式。

3 变熄弧角控制抑制后续换相失败的研究

多馈入直流输电系统的熄弧角表达式四为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2} n I_{\rm d} X_L}{U_L} + \cos\beta\right) \tag{5}$$

其中, I_{d} 为直流电流, X_{L} 为换相电抗, U_{L} 为换流母线 线电压有效值, β 为触发越前角,n为换流变压器的 变比。

换相失败的本质是熄弧关断角过小,通常直流逆 变器采用定熄弧角控制^[14],定熄弧角控制的目的是 维持γ角为整定值,以保证故障后换流阀不至反复重 燃以造成不同时刻的换相失败。逆变器定熄弧角控 制的原理是:将实际测定的各阀熄弧角 γ_{inv} 与熄弧角 整定值 $\gamma_{ref}(15^\circ)$ 进行比较,将它们的差值加上由电流 偏差引起的 Δγ后,与为使触发越前角β不超过 46° 而设定的另一定值 0.544(31°)比较,经过 PI 调节器 来控制逆变侧触发越前角指令 β_{inv-vo}

由熄弧角控制的原理可以对常规熄弧角控制做 出以下改进,以提高其抑制后续换相失败的效果:在 控制器中引入故障控制环节,使得在稳态期间,熄弧 角控制正常运行,而在直流电流或交流电压突变时, 由主控制层产生一个增大熄弧角整定值 γ_{ref}的附加 调节分量 γ_{fault},通过维持足够的换相裕度以避免逆变 侧发生后续的换相失败。设计的变熄弧角控制结构 如图 4 所示。



图 4 变熄弧角控制原理图 Fig.4 Schematic diagram of variable extinction angle control

在 PSCAD 仿真平台下,搭建变熄弧角控制模块, 并将其加入到 HVDC2 线路中,比较控制策略改进前 后 HVDC2 逆变侧熄弧角波形,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,未加变熄弧角控制时,直流线路 2 会受到故障线路影响,发生后续换相失败。控制 策略改进后,1 s 时直流电压突降,系统检测到故障, 触发脉冲动作,将熄弧角γ的整定值从 15° 增大到 18°,此时直流系统 2 的熄弧角有了较大的提升,1.2 s



图 5 控制策略改进前后熄弧角对比图 Fig.5 Comparison of extinction angles between original and improved control strategies

时不再发生后续换相失败。由此可见变熄弧角控制 在抑制多馈入系统后续换相失败方面效果是比较显 著的。但是,增大γ的整定值不仅会降低系统的传输 容量,还会大量增加系统所消耗的无功。对于故障持 续时间较长且无功不足的直流系统,通过增大γ的方 式抑制后续换相失败是不可靠的。为减少直流换流 站对所连交流的无功需求,下文将介绍一种基于渐 变恢复策略的新型 VDCOL 控制。

4 基于渐变恢复策略的新型动态 VDCOL 控制

VDCOL^[14]的作用是在交流电压或直流电压降低 到某个指定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,在维持交流电压的同时,有助于减小后续换相失 败发生的可能性。VDCOL 特性实现原理及曲线如图 6 所示。



图 6 典型 VDCOL 模型 Fig.6 Typical VDCOL model

图中, I_{des} 为上层传送电流设定的最小值,比较 VDCOL 的输出电流 I_{out} 和 I_{des} ,得到级控制级电流 I_{out} ; R_v 为复合电阻,用于确定 VDCOL 的起动电压是 由直流线路上哪一点的直流电压决定的; τ 为滤波 环节时间常数。

由图 6 可知,常规 VDCOL 控制在系统电压下降 与恢复期间,U-I 特性曲线是单一的,并未考虑到直 流系统在故障后恢复期间将对其所处交流系统产生 大量无功需求的特殊性^[15-16]。因此,本节对 VDCOL 控制曲线做出了一些改进,以解决这个特殊问题。具 体改进如图 7 所示。

正常情况下,VDCOL曲线与传统 VDCOL曲线 重合,运行在 FE 段,通过U_{LI}与 U_{HI}的设定达到限制 电流指令输出的目的。当系统受到扰动或发生故障



后,直流侧电压持续下降时,通过切换装置,由 U₁₂和 U₁₂沿线段 PQ 限制电流指令的输出,由于 U₁₂>U₁₁及 U₁₂>U₁₁,使得直流电流在较高的电压下就会达到 I₁ 和 I_H,这样总的效果就是减缓了直流系统的功率恢 复速度,从而减少了直流系统故障期间对交流系统 过快的无功需求,一定程度上稳固了系统电压及功 率的恢复特性并减少了后续换相失败发生的可能性。

然而对于多馈入直流输电系统,多个子系统同时 快速地恢复功率,仍会导致大量的无功需求。系统 整体无功需求的快速增加很可能引起后续换相失 败,此时针对单条直流线路的动态 VDCOL 控制的作 用将受到限制。为此本文设计了针对多条直流线路 的基于渐变恢复策略的新型动态 VDCOL 控制器,其 控制原理如图 8 所示。



图 8 基于渐变恢复策略的新型动态 VDCOL 控制模型 Fig.8 Dynamic VDCOL control model based on staggered recovery strategy

基于渐变恢复策略的新型 VDCOL 控制方式的 原理主要体现在:在动态 VDCOL 的基础上增加了延 时环节 e^{-sr},通过时间常数 τ 的设定在多馈入直流系 统备条线路间分别实现分时段恢复的目的。其实现 方式主要为:系统正常运行时,VDCOL 控制运行在 A 点,通过动态 VDCOL 控制模型中的 FE 段实现低压 限流功能。在系统突然发生故障导致不可避免的换 相失败时,由上级传来控制触发信号,使 VDCOL 控 制切换到 B 点,沿动态 VDCOL 控制模型中的 PQ 段 限制电流指令的输出,随后延时环节动作,在达到减 缓单条直流系统功率恢复速率的同时,实现多条直 流线路间功率交替恢复的目的。

在实现渐变恢复策略的过程中,各条线路延时装 置中时间常数 τ 的选择是一个需注意的问题。本文 采用 PSCAD 软件 Optimum Run 模块中的 SIMPLEX 算法^[17]对 τ 进行协调优化,以减小各回直流线路间 相互作用引发后续换相失败的几率。优化的目标函 数取为:

$$f = \int \left\{ \sum_{j=1}^{3} \left[k \left(I_{\text{refj}} - I_{dj} \right)^2 + (1 - \alpha) \left(\gamma_{\text{refj}} - \gamma_j \right)^2 \right] \right\} t \, \mathrm{d}t \qquad (6)$$

其中, I_{ref} 和 γ_{ref} 分别为直流电流指令和 γ 的参考值; I_{ij} 和 γ_j 分别为电流和 γ 的测量值; k 为比例系数, 本 文取 0.5。

根据上文中的控制策略,在三馈入直流系统各线路中分别加装基于渐变恢复策略的动态 VDCOL 控制器,根据本系统的实际情况,设定动态 VDCOL 装置整定值: $U_{L1}=0.4$ p.u., $U_{H1}=0.9$ p.u., $U_{12}=0.45$ p.u., $U_{H2}=0.95$ p.u., $I_L=0.55$ p.u., $I_H=1.0$ p.u.。优化后时间常数 $\tau_{hvdc1}=200$ ms, $\tau_{hvdc2}=120$ ms, $\tau_{hvdc3}=5$ ms。由优化后的时间常数可以看出,故障线路 1 功率恢复难度最大,故时间延迟最长;线路 3 与线路 1、2 电气距离较远,受故障影响小,故时间常数设置最小。控制器加装前后系统各条直流逆变侧熄弧角、有功功率、无功功率图形如图 9 所示(左列为加装前,右列为加装后)。



图 9 控制策略改进前后熄弧角、功率波形对比图

Fig.9 Comparison of extinction angles and power waveforms between original and improved control strategies

由图9可见,当多馈入直流系统采用常规 VDCOL

控制,在1s系统发生短路故障后,线路2、3直流逆 变侧熄弧角很快恢复,故障切除后线路1逆变侧熄 弧角也迅速恢复,但由于故障切除后各回线路间不良 的相互作用给系统带来的负面影响,1.18 s 线路 1、2 发生后续换相失败,有功功率传输再次下降,而3条 线路同时对系统产生的快速无功需求导致无功恢复 速度缓慢,2s左右系统无功才基本恢复正常。采用 本文设计的控制模型后,后续换相失败不再发生,系 统有功功率传输不再发生二次下降,控制效果显著。 其中,动态 VDCOL 环节减缓了直流系统故障期间对 交流系统过快的无功需求,因此缩短了无功功率恢 复的时间,1.6s左右系统无功功率已恢复正常,恢复 时间缩短了40%。渐变恢复策略中时间常数的优化 在有功功率恢复中得到很好的体现.1.20 s 与其他两 回直流电气距离较远的线路3有功首先恢复,同时 线路2有功开始恢复,1.26s左右达到额定值,线路 2、3有功依次恢复后,线路1有功开始逐渐恢复, 1.80 s恢复正常。无功功率方面,由于线路1、2 延迟 恢复功率,由逆变侧滤波器提供的过剩无功为线路 3的恢复提供了无功支撑,故障切除后时间常数的配 合使得线路1、2的无功依次恢复。

5 结论

a. 在一个三馈入直流输电系统中仿真验证了 SVC 和设计的变熄弧角控制器在抑制后续换相失败 中的作用.并分别指出其应用推广的限制因素。

b. 针对以上 2 种控制方式的缺陷,提出了一种 基于渐变恢复策略的动态 VDCOL 控制,该控制通过 延缓单条直流功率恢复速率以降低系统故障时对交 流系统的无功需求,同时利用延时环节消除了暂态 过程中各条直流线路间不良相互影响,最终可有效 抑制后续换相失败,实现多条直流线路间功率交替 恢复的目的。延时环节时间常数的整定可以依照与 故障线路电气距离的远近设置。仿真波形证明了该 控制方式的有效性。

参考文献:

- [1] 何朝荣,李兴源,金小明,等. 高压直流输电系统换相失败的判断标准[J]. 电网技术,2006,30(22):19-23.
 HE Chaorong,LI Xingyuan,JIN Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2006,30(22):19-23.
- [2] THIO C V, DAVIES J B, KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996,11(2):946-957.
- [3] RAHIMI E,GOLE A M,DAVIES J B,et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems [C] // The 8th IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.I.]:IEEE,2006;182-186.

- [4] ZHOU Changchun, XU Zheng. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system[C]//IEEE Proceedings of International Conference on Power System Technology. [S.l.]:IEEE,2002: 2462-2466.
- [5] 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.
- [6] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入直流输电系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备,2002,22(11):63-66.

YANG Weidong,XU Zheng,HAN Zhenxiang. Coordinated recovery strategy for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11):63-66.

[7] 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.

- [8] 汪娟娟,张尧,林凌雪,等. 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):79-82.
 WANG Juanjuan,ZHAN Yao,LIN Lingxue,et al. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):79-82.
- [9] 邵瑶,汤涌.采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):108-114. SHAO Yao,TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J].
- Proceedings of the CSEE,2012,32(4):108-114. [10] 刘建,李兴源,吴冲,等. HVDC 系统换相失败的临界指标[J]. 电网技术,2009,33(8):8-12. LIU Jian,LI Xingyuan,WU Chong, et al. Research on critical

index of commutation failure in HVDC system[J]. Power System Technology, 2009, 33(8):8-12.

[11] 邵瑶,汤涌,郭小江,等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地

区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术,2011,35 (10):9-15.

SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China Power Grids planned for UHV power grids in 2015 [J]. Power System Technology, 2011, 35 (10):9-15.

- [12] SONG Y H, JOHNS A T. Flexible AC transmission systems [M]. London, UK: IEE Press, 1999:26-32.
- [13] 刘天琪.现代电力系统分析理论与方法[M].北京:中国电力出版社,2007:94-97.
- [14] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版 社,2004:40-42.
- [15] 王珂,杨卫东,方勇杰,等. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究[J]. 江苏电机工程,2007,26(1):1-4.
 WANG Ke,YANG Weidong,FANG Yongjie,et al. Study of VDCOL control strategies for coordinated recovery of multifeed-in HVDC system[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2007,26 (1):1-4.
- [16] 付颖,罗隆福,童泽,等. 直流输电控制器低压限流环节的研究
 [J]. 高电压技术,2008,34(6):1110-1114.
 FU Ying,LUO Longfu,TONG Ze,et al. Study on voltage
 - dependent current order limiter of HVDC transmission system's controller[J]. High Voltage Engineering,2008,34(6):1110-1114.
- [17] NELDER J A, MEAD R. A simplex method for function minimization[J]. The Computation Technology, 1965, 7(4): 308-313.

作者简介:

郭利娜(1990-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为电 力系统分析计算及稳定(**E-mail**:xiaoxiaoxinshoug@163.com);

刘天琪(1962-),女,四川成都人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输 电、调度自动化:

李兴源(1945-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电。

Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system

GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan

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

Abstract: Aiming at the follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system, a typical multi-infeed HVDC model is established to specify the effect of SVC on the inhibition of follow-up commutation failures and a method based on the essence of commutation failures is put forward to control the variable arc extinction angle. The defect of the variable arc extinction angle control method in application is analyzed and a dynamic VDCOL control model based on the staggered recovery strategy is further proposed, which uses the dynamic VDCOL to delay the power recovery rate of single line for reducing the reactive power demand of DC system during faults and eliminating the adverse interaction between different DC lines. The DC lines are thus recovered in a staggered way to effectively inhibit the follow-up commutation failures. The simulative results show its effectiveness.

Key words: multi-infeed HVDC system; HVDC power transmission; follow-up commutation failure; arc extinction angle control; staggered recovery; models