

基于定等效直流输入电阻的低压限流控制器优化控制策略

刘 勃¹, 陈 中¹, 杨 凯¹, 路 晨¹, 严 俊¹, 庄卫金²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 低压限流控制器(VDCOL)是抑制基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)系统后续换相失败的重要控制环节,通过分析LCC-HVDC系统换流器换相过程,提出一种基于等效直流输入电阻的VDCOL优化方案评价指标以及一种基于定等效直流输入电阻的VDCOL优化控制策略。基于CIGRE HVDC标准测试模型对故障期间不同类型的VDCOL优化方案进行仿真测试以验证所提评价指标的合理性和所提控制策略的有效性,仿真结果表明:故障期间等效直流输入电阻与关断角呈正相关;采用所提控制策略后等效直流输入电阻能够尽快恢复并保持在1.0 p.u.附近;同时所提控制策略可以有效抑制LCC-HVDC系统后续换相失败。

关键词: 高压直流输电系统;换相失败;评价指标;低压限流控制器;优化

中图分类号: TM 721.1

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202202031

0 引言

换相失败作为基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)系统中较为常见的故障,对电网的安全与稳定运行造成巨大威胁^[1-3]。对控制系统进行合理设计可以有效减轻换相失败对电网带来的损害。低压限流控制器VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter)作为直流控制系统的重要组成部分,在抑制LCC-HVDC系统后续换相失败方面发挥着重要作用。

国内外学者对常规VDCOL优化方案进行了大量研究。故障期间减少LCC-HVDC系统换相失败次数的优化与评估依据为:当直流电压处于较低水平时,交流系统无法提供充足的无功功率,直流电流增速应较慢;反之直流电流增速应较快^[4]。若优化后的VDCOL可使直流电流按照上述评估依据进行恢复,则可以大幅降低后续换相失败的概率。文献[5]设计了一种与虚拟电阻控制方法相结合的精确变斜率VDCOL,通过改变控制器的补偿电压抑制后续换相失败。文献[6]指出固定参数的VDCOL难以适应多馈入系统的多种运行方式,需要采用自整定的方式来调整VDCOL的参数。文献[7-8]提出虚拟电阻限流控制器与常规VDCOL相结合的方法,提升了系统对故障反应的灵敏度。文献[9]基于直流电流预测与虚拟电阻控制增强VDCOL抵御换相失败的能力。文献[10]指出剧烈抖动的VDCOL启动电压是导致系统故障期间发生连续换相失败的重要因素。

上述VDCOL优化方案以故障期间减少LCC-HVDC系统换相失败次数为评估依据进行定性设计,本文提出一种基于等效直流输入电阻的VDCOL优化方案评价指标,该指标可以定量评估VDCOL优化方案的合理性,进而为其抑制LCC-HVDC系统后续换相失败提供理论支撑。

目前VDCOL的优化方案大多集中于改变其固定参数、设置故障恢复曲线的斜率以及与其他优化环节的协调运行方面。文献[11]分析了交流电压与直流电压分别作为控制器输入信号的优势,设计合理的输入信号转换策略,有效减少了后续换相失败次数。文献[12]提出一种基于附加触发角和改进VDCOL的联合运行控制策略,以锁相电压与实际电压的差值作为该控制策略的启动判据,同时改进VDCOL提供合适的电流参考值以降低换相失败次数。文献[13]根据系统发生故障的严重程度动态调整VDCOL的控制曲线,限制故障期间的直流电流升高,从而更为合理地发出直流电流指令。文献[14]提出基于广域测量系统的VDCOL协调控制方法,根据测量结果动态调整各个子系统VDCOL的输入与输出信号,以弥补固定参数下VDCOL的不足。文献[15]提出利用虚拟电感与变斜率VDCOL相结合的方法,使直流系统换流器在故障恢复期间更加合理地吸收无功功率。文献[16]提出了一种提高常规的VDCOL与电流偏差控制器配合度的优化方案。文献[17]通过在线优化VDCOL的参数、换相失败预防控制参数以及电流偏差控制器参数减少直流系统与受端系统交换的最大无功功率,最大限度稳定换流母线电压。以上研究成果主要是对VDCOL的参数设置、故障恢复特性等环节进行改进,常规VDCOL控制方案存在的参数整定、故障恢复曲线选取以及控制协调等方面的问题难以得到解决。

收稿日期:2021-05-08;修回日期:2021-12-31

在线出版日期:2022-03-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900602)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900602)

本文首先提出基于等效直流输入电阻的评价指标,以评估VDCOL优化方案的合理性。其次根据评价指标的特性,提出基于定等效直流输入电阻的抑制后续换相失败的控制策略,以替代常规VDCOL控制环节。最后基于CIGRE HVDC标准测试模型验证本文所提评价指标在评估VDCOL性能方面的合理性以及所提控制策略在抑制LCC-HVDC系统后续换相失败方面的有效性。

1 LCC换相过程

1.1 换相机理

目前我国LCC-HVDC系统多采用12脉动换流器。当进行建模分析时12脉动换流器可采用附录A图A1所示2台6脉动换流器级联得到($V_1 \sim V_6$ 为换流阀)。由图可知, t 时刻下通过 V_6 的直流电流 $I_d(t)$ 保持不变,通过 V_5 的直流电流逐渐减小,而通过 V_1 的电流逐渐增大。当换流器正常换相时,a相电压 U_a 、c相电压 U_c 需要满足 $U_a > U_c$,同时反向线电压 U_{ca} 的作用时间大于 V_5 自身去游离所需时间与换相所需时间之和。根据基尔霍夫电压定律,换相方程为:

$$T_i U_a - L_c \frac{di_a(t)}{dt} - T_i U_c + L_c \frac{di_c(t)}{dt} = 0 \quad (1)$$

式中: T_i 为逆变侧换流变压器变比; $i_a(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为 t 时刻下a相、c相的桥臂电流; L_c 为换流电感。根据基尔霍夫电流定律($I_d(t) = i_c(t) + i_a(t)$)及 $dI_d(t)/dt = 0$,可得:

$$T_i U_a - L_c \frac{di_a(t)}{dt} - T_i U_c + L_c \frac{d(I_d(t) - i_a(t))}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$2L_c \frac{di_a(t)}{dt} = T_i (U_a - U_c) = T_i U_{ac} \quad (3)$$

1.2 关断角计算方法

逆变器在正常换相过程中,每个换流阀的换相角均相同。换相线电压 U_{ac} 的表达式为:

$$U_{ac} = U_a - U_c = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: E 为换流母线线电压有效值; ω 为系统角频率。对式(3)两侧进行积分可得:

$$i_a(t) = \frac{\sqrt{2} T_i E}{2\omega L_c} [k - \cos(\omega t)] \quad (5)$$

式中: k 为积分过程产生的常数。设 α 为逆变器延迟触发角($\alpha > \pi/2$), γ 为关断角, μ 为换相重叠角, β 为逆变侧换流器的超前触发角,四者之间的关系见式(6)、(7)。

$$\alpha + \mu + \gamma = \pi \quad (6)$$

$$\beta = \mu + \gamma \quad (7)$$

以电流从 V_5 、 V_6 所在桥臂向 V_6 、 V_1 所在桥臂换相(简称 $V_5 \rightarrow V_1$ 换相)为例,当 $\omega t = \alpha$ 时, V_1 收到触发脉冲信号处于导通状态,导通瞬间通过 V_1 的直流电

流为0,即:

$$I_d = i_a(\alpha/\omega) = \frac{\sqrt{2} T_i E}{2\omega L_c} (k - \cos \alpha) = 0 \quad (8)$$

当 $\omega t = \pi - \gamma$ 时, $V_5 \rightarrow V_1$ 换相完成,此时通过 V_1 的直流电流表达式为:

$$I_d = i_a(\pi/\omega - \gamma/\omega) = \frac{\sqrt{2} T_i E}{2\omega L_c} [k - \cos(\pi - \gamma)] \quad (9)$$

联立式(8)、(9)可得关断角计算公式为:

$$\cos \gamma = \frac{\sqrt{2} \omega L_c I_d}{T_i E} - \cos \alpha \quad (10)$$

2 基于等效直流输入电阻的VDCOL性能评价指标

LCC-HVDC系统如图1所示,直流输电线路采用T型等值电路,两侧交流系统为整流站和逆变站提供换相电压和换相电流。图中: U_{dor} 、 U_{doi} 分别为整流侧、逆变侧无相控理想空载直流电压; U_{dr} 、 U_{di} 分别为整流侧始端、逆变侧末端直流电压; $U_{dor} \cos \alpha$ 、 $U_{doi} \cos \gamma$ 分别为整流侧、逆变侧相控理想空载直流电压; R_{Cr} 、 R_{Ci} 分别为整流侧、逆变侧换流器等效换相电阻; R 、 L 、 C 分别为直流线路的等效电阻、电感、电容; L_d 为平波电抗器电感。

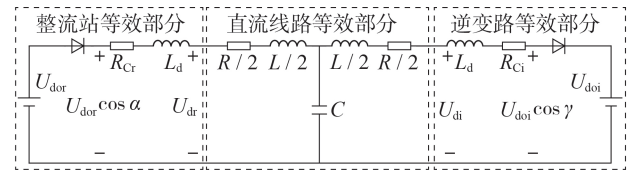


图1 LCC-HVDC系统等值电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of LCC-HVDC system

LCC-HVDC系统每极由 N 组6脉动换流器串联组成,整流侧和逆变侧无相控理想空载直流电压计算公式分别如式(11)、(12)所示。

$$U_{dor} = 3\sqrt{2} N E_r T_r / \pi \quad (11)$$

$$U_{doi} = 3\sqrt{2} N E_i T_i / \pi \quad (12)$$

式中: T_r 为整流侧换流变压器变比; E_r 、 E_i 分别为整流侧、逆变侧换流母线线电压有效值。

逆变侧交流系统发生故障所导致的换流母线线电压有效值降低是引起换相失败的主要原因。此时逆变侧换流器主要采用定关断角控制,逆变侧关断角等于额定关断角 γ_0 ,逆变侧末端直流电压为:

$$U_{di} = U_{doi} \cos \gamma_0 - N I_d R_{Ci} \quad (13)$$

联立式(12)、(13)可得逆变侧末端直流电压与逆变侧换流母线线电压有效值间的关系式为:

$$E_i = \frac{\pi (U_{di} + N I_d R_{Ci})}{3\sqrt{2} N T_i \cos \gamma_0} \quad (14)$$

联立式(6)、(7)、(12)、(14)可得:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{6N\omega L_c \cos \gamma_0}{\pi} \frac{I_d}{U_{di} + N I_d R_{Ci}} + \cos \beta \right) \quad (15)$$

关断角是评价 VDCOL 优化方案最直接的指标,由式(15)可得基于等效直流输入电阻的评价指标为:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{A}{KR_{eqi} + N} + \cos \beta \right) \quad (16)$$

$$R_{eqi} = \frac{U_{di}}{I_d} = \frac{U_{di}^2}{P_{di}} \quad (17)$$

$$A = 2N \cos \gamma_0 \quad (18)$$

$$K = 1/R_{Ci} \quad (19)$$

式中: A 、 K 、 N 均为常数; R_{eqi} 为等效直流输入电阻; P_{di} 为逆变侧末端的直流功率。由式(16)可知:等效直流输入电阻与关断角呈正相关;关断角应在额定值附近以抑制 LCC-HVDC 系统后续换相失败;等效直流输入电阻取值过大或者过小将导致故障期间 LCC-HVDC 系统发生后续换相失败。当等效直流输入电阻过小时,关断角随之减小,根据多次仿真验证数据,当等效直流输入电阻小于 0.55 p.u. 时换相失败发生概率高达 93.43%;当受端交流电网为弱系统时,根据多次仿真验证数据,当等效直流输入电阻大于 2.1 p.u. 时后续换相失败发生概率高达 94.75%,这是因为当受端交流电网强度较小时,不能提供充足的无功,换流器吸收过量无功将导致 LCC-HVDC 系统发生后续换相失败。

由上述基于等效直流输入电阻的评价指标可判断 VDCOL 优化方案的合理性,同时若故障期间等效直流输入电阻能够快速恢复并保持在 1.0 p.u. 附近,即可进一步定量说明 VDCOL 优化方案的合理性。相较于其他常规 VDCOL 优化方案以减少故障期间 LCC-HVDC 系统换相失败次数为评估依据,本文提出的评价指标具有定量评价的特征,且无需考虑整定参数以及故障恢复曲线斜率等因素的影响。

3 基于定等效直流输入电阻的 VDCOL 优化控制策略

基于上文所提等效直流输入电阻的 VDCOL 性能评价指标,本文提出一种基于定等效直流输入电阻的 VDCOL 优化控制策略。该优化策略结合所提评价指标对 VDCOL 直流电流指令值进行重新整定,从而减少 LCC-HVDC 系统换相失败次数。

3.1 常规 VDCOL 控制特性

当 LCC-HVDC 系统发生故障时, VDCOL 能够在直流电压下降到某一值时抑制直流电流快速增大,其控制特性如图 2 所示。图中: U_{dc} 为直流电压; I_d 为直流电流; U_L 、 U_H 分别为直流电压下限值、上限值; I_{min} 、 I_{max} 分别为直流电流最小值、最大值。一般地, $U_H < 1.0$ p.u., $I_{max} = 1.0$ p.u.。VDCOL 直流电压和直

流电流指令值 I_{ord} 关系如式(20)所示。

$$I_{ord} = \begin{cases} I_{min} & U_{dc} \leq U_L \\ I_{min} + \frac{I_{max} - I_{min}}{U_H - U_L} (U_{dc} - U_L) & U_L \leq U_{dc} \leq U_H \\ I_{max} & U_{dc} \geq U_H \end{cases} \quad (20)$$

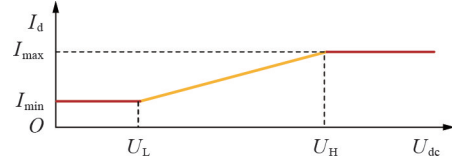


图2 常规 VDCOL 控制特性示意图

Fig.2 Schematic diagram of control characteristics of conventional VDCOL

3.2 基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略

基于定等效直流输入电阻的抑制后续换相失败的控制策略分析如式(21)所示。

$$\Delta R_{eqi} = \left| \frac{U_{dN}^2}{P_{dN}} - \frac{U_{me}^2}{P_{me}} \right| = \left| \frac{U_{dN}}{I_{dN}} - \frac{U_{me}}{I_{me}} \right| \quad (21)$$

式中: ΔR_{eqi} 为等效直流输入电阻的变化量,其值为额定等效直流输入电阻与实际等效直流输入电阻之差; U_{dN} 、 U_{me} 分别为直流电压额定值、实测值; P_{dN} 、 P_{me} 分别为直流功率额定值、实测值; I_{dN} 、 I_{me} 分别为直流电流额定值、实测值。直流系统发生故障时及故障恢复期间令 $\Delta R_{eqi} = 0$, 则直流电流指令值 I_{ord} 可表示为:

$$I_{ord} = \left| \frac{U_{me} I_{dN}}{U_{dN}} \right| \quad (22)$$

当逆变侧交流系统发生故障时,直流电压会快速下降甚至跌落至 0。由式(22)可知,当直流电压跌落至 0 时,直流电流指令也将跌落至 0。为了减少直流功率中断对两侧交流系统带来的冲击,直流电流指令值在输出时需要经过限流环节保证其不能降至 0,故将式(22)修正为式(23)。

$$I_{ord} = \begin{cases} \left| \frac{U_{me} I_{dN}}{U_{dN}} \right| & U_{me} \geq U_{deritic} \\ I_{ord.min} & U_{me} < U_{deritic} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $U_{deritic}$ 为直流电压门槛值, $I_{ord.min}$ 为 I_{ord} 最小值,二者均需根据实际情况设定。当逆变侧交流系统发生故障时,使用新获得的直流电流指令值替代 VDCOL 发出的直流电流指令值。在控制系统调控作用下,直流电流会尽可能地跟踪新发出的直流电流指令值。以使等效直流输入电阻保持在 1.0 p.u. 附近,关断角处于额定值附近,从而抑制换流器换相失败。当交流系统发生故障时,直流电压或交流电压在无外界支援的情况下只能被动减小,故本文考虑改变直流电流指令值的形式使等效直流输入电阻保持在 1.0 p.u. 附近。

基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略控制框图见图3,该策略可分为额定等效直流输入电阻计算、实际等效直流输入电阻测量、直流电流指令生成3个环节。图中: $G_1/(1+sT_1)$ 、 $G_2/(1+sT_1)$ 为一阶惯性环节传递函数,分别模拟计算额定直流电流、电压和测量实际直流电流、电压的过程, T_1 为惯性时间常数,模拟测量设备的响应速度, G_1 、 G_2 为增益函数,其主要作用是将直流电流、电压进行标么化处理; $U_{me,fil}$ 、 $I_{ord,ref}$ 分别为经滤波后的直流电压、经比较最终生成的直流电流指令值; $|1/X|$ 表示取倒数; $\max(\cdot, \cdot)$ 、 $\min(\cdot, \cdot)$ 分别为取最大值、最小值函数。考虑不同惯性时间常数对本文所提基于定等效直流输入电阻换相失败抑制策略的影响,仿真结果见附录A图A2,由图可知不同惯性时间常数对本文所提策略影响不大,故取 $T_1=0.02$ s。

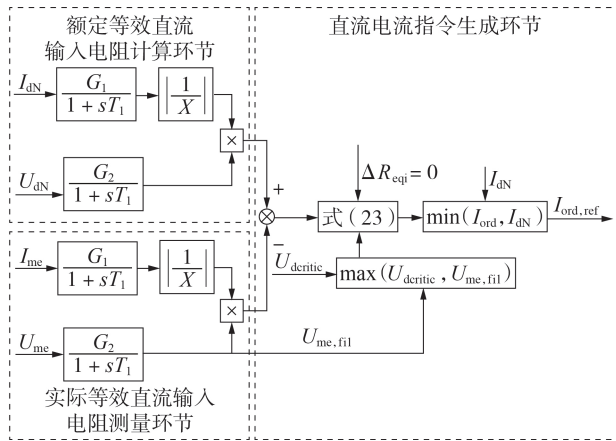


图3 基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略控制框图

Fig.3 Control block diagram of suppression commutation failure control strategy based on constant equivalent DC input resistance

4 仿真分析与验证

4.1 仿真模型

基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建CIGRE HVDC标准测试模型。计及各类误差,设置当实际关断角小于其临界值(10°)时判定换流器发生换相失败,并设 $U_{dcr,lim}=0.67$ p.u., $I_{ord,min}=0.67$ p.u., $R_{ci}=14 \Omega$, $\gamma_0=15^\circ$,其余参数设置见附录A表A1、A2。

4.2 验证所提评价指标的合理性

设置以下4种方案验证基于等效直流输入电阻的VDCOL优化方案评价指标的合理性:①方案1,文献[5]所提与虚拟电阻控制方法相结合的精确变斜率VDCOL优化方案;②方案2,常规的VDCOL控制方法;③方案3,文献[7]所提虚拟电阻限流控制器与常规VDCOL相结合的优化方案;④方案4,本文所提基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略。

4种方案关键参数设置见附录A表A3。以接地电感 L_f 大小表示故障严重程度:当 L_f 较小时,故障较为严重,故障点距离换流母线的电气距离较近;反之表示故障程度较弱。限于篇幅,本文在故障较为严重的单相接地故障($L_f=0.2$ H)、三相接地故障($L_f=0.1$ H)下验证等效直流输入电阻作为VDCOL优化方案评价指标的合理性以及基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略的有效性。

设故障发生时刻为1.0 s,惯性常数为0.02 s,故障持续时间为0.5 s。当发生单相、三相接地故障时4种方案下 γ 与 R_{eqi} (标么值,后同)仿真结果分别见图4和附录A图A3。由图4可知:故障期间 γ 与 R_{eqi} 呈正相关;故障期间方案1、3、4下的 R_{eqi} 能够快速恢复并且保持在1.0 p.u.附近,此时关断角大于 10° ,方案1、4能够将换相失次数控制在1次,即关断角仅有1次跌落至 10° 以下;而故障期间方案2下的 R_{eqi} 大幅偏离1.0 p.u.。由此可见,相较于方案2中的常规VDCOL控制方法,方案1、3、4中优化后的VDCOL对于单相接地故障下LCC-HVDC系统后续换相失败均能起到较好的抑制作用,这验证了所提评价指标的合理性。

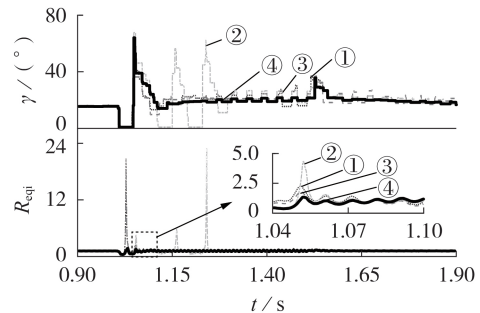


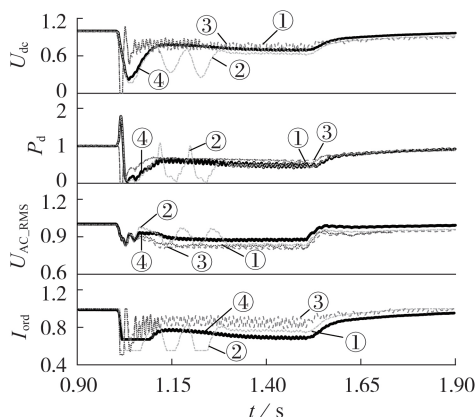
图4 单相接地故障下 γ 与 R_{eqi} 对比
Fig.4 Comparison of γ and R_{eqi} under single-phase grounding fault

由附录A图A3可知:故障期间 γ 与 R_{eqi} 呈正相关;方案1、4下的 R_{eqi} 在故障发生后45 ms左右恢复并保持在1.0 p.u.附近;而方案2、3下的 R_{eqi} 大幅偏离1.0 p.u.,并未能在短时间内恢复并保持在1.0 p.u.附近,此时关断角出现多次小于 10° 的现象,即方案2、3对于三相接地故障下LCC-HVDC系统后续换相失败的抑制效果并不明显。这说明方案1、4中优化后的VDCOL对于三相接地故障下LCC-HVDC系统后续换相失败具有抑制作用,进一步验证了所提评价指标的合理性。

4.3 验证所提控制策略的有效性

通过与方案1—3的控制效果进行对比,验证本文所提基于定等效直流输入电阻的换相失败抑制策略的有效性与优越性。

当发生单相、三相接地故障时4种方案下直流电压 U_{dc} 、直流功率 P_d 、换流母线交流电压有效值 U_{AC_RMS} 和直流电流指令 I_{ord} (上述变量均为标么值) 仿真结果分别见图5和附录A图A4。由图5可知:相较于方案1—3,方案4下的 U_{dc} 没有产生剧烈波动,而 U_{dc} 剧烈波动是造成后续换相失败的重要原因,这说明了所提控制策略具有一定的优越性;方案1、3、4下 P_d 波形变化趋势相差明显,方案2下的 P_d 波形存在3次跌落至0的现象,对两侧交流系统造成重大冲击。相较于方案1、3下的 U_{AC_RMS} ,方案4下 U_{AC_RMS} 较高,有利于系统恢复至正常状态^[18];相较于方案1、3,方案4下的 I_{ord} 没有产生剧烈波动,而 I_{ord} 剧烈波动会造成换流阀触发脉冲极为频繁地改变触发命令,加重换流阀的负担,进一步说明了所提控制策略具有一定的优越性。由图A4可知,相较于方案1、2、3,方案4下 U_{dc} 、 P_d 、 U_{AC_RMS} 和 I_{ord} 的恢复过程较为平稳,没有产生剧烈振荡,有利于促进系统恢复稳定运行。



①方案1, ②方案2, ③方案3, ④方案4

图5 单相接地故障下 U_{dc} 、 P_d 、 U_{AC_RMS} 和 I_{ord} 对比

Fig.5 Comparison of U_{dc} 、 P_d 、 U_{AC_RMS} and I_{ord} under single-phase grounding fault

4.4 短路比及故障水平不同时所提控制策略的有效性

为了进一步定量分析所提控制策略在抑制 LCC-HVDC 系统换相失败方面的有效性,设置不同短路比 SCR (Short Circuit Ratio) 及不同故障水平 2 种场景,证明本文所提控制策略相较于其他控制策略的优势^[19],引入故障水平指标 F_L 、换相失败免疫因子 CFII (Commutation Failure Immunity Index) ξ_{CFII} 和换相失败发生概率指数 CFPI (Commutation Failure Probability Index) ξ_{CFPI} 予以衡量。 ξ_{CFII} 越大、 ξ_{CFPI} 越小说明本文所提控制策略抵御换相失败的能力越强^[20]。3 个指标的计算公式分别如式(24)—(26)所示。

$$F_L = \frac{1}{P_{dN}} \frac{E^2}{\omega L_f} \times 100 \% \quad (24)$$

$$\xi_{CFII} = \frac{P_{cf}}{P_{dN}} \times 100 \% = \frac{E^2}{Z_{c, fault}} \times 100 \% \quad (25)$$

$$\xi_{CFPI} = \frac{N_c}{N_T} \times 100 \% \quad (26)$$

式中: P_{cf} 为故障临界功率; $Z_{c, fault}$ 为临界阻抗; N_c 为换相失败次数; N_T 为一个周期内仿真次数总和。

发生单相、三相接地故障后4种方案下短路比不同时的 ξ_{CFII} 对比情况分别见附录A图A5(a)、(b)。由图可知:当逆变侧交流系统的短路比由2.5逐渐增大到9.5时,随着短路比的增加,4种方案下在单相接地故障和三相接地故障下的 ξ_{CFII} 均增大,方案4下 ξ_{CFII} 的明显高于方案1—3。当逆变侧交流系的短路比为9.5时,发生单相接地故障和三相接地故障后4种方案下故障水平不同时的 ξ_{CFPI} 对比情况分别见附录A图A5(c)、(d)。由图可知,随着故障水平的增加,方案4的 ξ_{CFPI} 明显低于方案1—3。由此可见本文所提控制策略抵御换相失败的能力较强。

5 结论

1) 本文提出了一种基于等效直流输入电阻的 VDCOL 优化方案评价指标,从理论分析和仿真验证方面证明了等效直流输入电阻与关断角呈正相关,并验证了不同 VDCOL 优化方案下所提评价指标的合理性;

2) 提出了一种基于定等效直流输入电阻的 VDCOL 优化控制策略,基于 CIGRE HVDC 标准测试模型对单相、三相接地故障期间不同类型 VDCOL 的性能进行仿真测试以验证所提控制策略的有效性,仿真结果表明采用所提控制策略后等效直流输入电阻能够尽快恢复并保持在 1.0 p.u. 附近,所提控制策略可以有效抑制 LCC-HVDC 系统后续换相失败;

3) 所提的控制策略尚未计及直流线路电感、电容暂态变化的影响,且其在实际工程中的验证情况将在后续工作中展开研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 28-35.
ZENG Xueyang, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 28-35.
- [2] 翁汉琨,王胜,饶丹青,等. 后续换相失败引发的换流变零序差动保护误动场景分析及策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 64-70.

- WENG Hanli, WANG Sheng, RAO Danqing, et al. Analysis of mal-operation scenarios of zero-sequence differential protection of converter transformer caused by subsequent commutation failure and corresponding strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 64-70.
- [3] 欧阳金鑫, 叶俊君, 张真, 等. 电网故障下多馈入直流输电系统相继换相失败机理与特性[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 93-102.
- OUYANG Jinxin, YE Junjun, ZHANG Zhen, et al. Mechanism and characteristics of successive commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system under power grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 93-102.
- [4] 刘磊, 王渝红, 李兴源, 等. 基于模糊控制的变斜率VDCOL控制器设计[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1814-1818.
- LIU Lei, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1814-1818.
- [5] 王立舒, 刘勃, 乔帅翔, 等. 改变获取补偿电压方法的精确变斜率VDCOL设计[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2740-2750.
- WANG Lishu, LIU Bo, QIAO Shuaxiang, et al. Design of precise variable slope VDCOL for changing the method of obtaining compensation voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2740-2750.
- [6] 胡松伶, 王渝红, 李兴源. 有利于多馈入系统恢复的自适应变结构VDCOL控制[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 90-95.
- HU Songling, WANG Yuhong, LI Xingyuan. Adaptive variable structure VDCOL control strategy for coordinated recovery of MDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 90-95.
- [7] 郭春义, 李春华, 刘羽超, 等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4930-4937, 5117.
- GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937, 5117.
- [8] 陆翌, 童凯, 宁琳如, 等. 基于虚拟电感的双馈入直流输电系统连续换相失败的抑制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1503-1509.
- LU Yi, TONG Kai, NING Linru, et al. A method mitigating continuous commutation failure for double-infeed HVDC system based on virtual inductor[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1503-1509.
- [9] 周泓宇, 姚伟, 李程昊, 等. 一种可降低首次换相失败风险的预测型低压限流控制[J/OL]. 高电压技术. (2021-07-23)[2021-10-28]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210532>.
- [10] 李瑞鹏, 李永丽, 陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.
- LI Ruipeng, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.
- [11] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进VDCOL的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
- ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [12] 程帆, 姚良忠, 王志冰, 等. 一种基于虚拟锁相电压的换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2756-2766.
- CHENG Fan, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. A commutation failure mitigation strategy based on virtual phase lock loop voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2756-2766.
- [13] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性VDCOL控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.
- MENG Qingqiang, LIU Zehong, HONG Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127.
- [14] 曾琦, 李兴源, 冯明, 等. 基于广域测量系统的多馈入直流低压限流单元的协调控制方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1168-1174.
- ZENG Qi, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. Coordinated control method of VDCOLs in MDC system based on the wide-area measurement system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1168-1174.
- [15] 王立舒, 宋鹤, 李天舒, 等. 抑制换相失败的变斜率VDCOL控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 80-87.
- WANG Lishu, SONG He, LI Tianshu, et al. Variable-slope VDCOL control strategy to suppress commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(7): 80-87.
- [16] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3172.
- LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [17] 雷霄, 孙栩, 李新年, 等. 适应大容量直流接入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 205-209.
- LEI Xiao, SUN Xu, LI Xinnian, et al. Optimization methods of pole control system for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 205-209.
- [18] 马星, 李凤婷, 尹纯亚. 整流侧换流母线电压恢复对逆变器换相的影响[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2950-2960.
- MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya. Impact of voltage restoration of commutation bus on rectifier side on commutation of inverters[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2950-2960.
- [19] GUO C Y, ZHANG Y, GOLE A M, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1529-1537.
- [20] WANG J J, HUANG M H, FU C, et al. A new recovery strategy of HVDC system during AC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 486-495.

作者简介:



刘 勃

刘 勃(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为直流输电、交直流混联系统稳定与控制(E-mail: 230208789@seu.edu.cn);

陈 中(1975—),男,研究员,博士生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电动汽车与电网互动、交直流混联系统稳定与控制(E-mail: zhongchen@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Optimal control strategy of voltage dependent current order limiter based on constant equivalent DC input resistance

LIU Bo¹, CHEN Zhong¹, YANG Kai¹, LU Chen¹, YAN Jun¹, ZHUANG Weijin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limiter) is an important control link to suppress the subsequent commutation failure of LCC-HVDC (Line-Commutated-Converter based High Voltage Direct Current) system. By analyzing the converter commutation process of LCC-HVDC system, an evaluation index of VDCOL optimal schemes based on equivalent DC input resistance and an optimal control strategy of VDCOL based on constant equivalent DC input resistance are proposed. Based on the CIGRE HVDC standard test model, different types of VDCOL optimal schemes during fault period is simulated and tested to verify the rationality of the proposed evaluation index and the effectiveness of the proposed control strategy. The simulation results show that the equivalent DC input resistance is positively correlated with the turn-off angle during fault period. After adopting the proposed control strategy, the equivalent DC input resistance can be restored as soon as possible and keep at around 1.0 p.u.. At the same time, the proposed control strategy can effectively suppress the subsequent commutation failure of LCC-HVDC system.

Key words: HVDC power transmission system; commutation failure; evaluation index; VDCOL; optimization

(上接第96页 continued from page 96)

Reliability evaluation to UPFC with abnormal state and routine test

LI Shenghu^{1,2}, HU Tao^{1,2}, CHANG Yaling^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Power Utilization and Energy Saving, Hefei 230009, China)

Abstract: The availability of UPFC (Unified Power Flow Controller) depends on the reliability of its components and their routine test strategies. According to the sudden failure ratio of the component, a calculative method of the transition rate of the component with abnormal state is proposed, and the state-space model of UPFC with abnormal state and routine test is built. A sensitivity model of UPFC reliability to failure ratio of the component is built to confirm the vulnerable component, moreover the influence of the routine test parameters on the UPFC's reliability is quantified. According to the analytical results of sensitivity model, the vulnerable component of UPFC is confirmed, the reliability of UPFC with abnormal state and the routine test is quantified, and the influences of the ratio of sudden failure and the ratio from the abnormal state to failure state on the UPFC's reliability are analyzed. The accuracy of the sensitivity analysis method of UPFC reliability with routine test is verified by comparing with the perturbation method.

Key words: UPFC; reliability; abnormal state; routine test; sensitivity analysis

附录 A

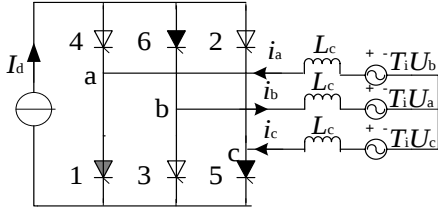


图 A1 LCC 换相过程简化图($V_5 \rightarrow V_1$)

Fig.A1 Simplified diagram of LCC commutation process($V_5 \rightarrow V_1$)

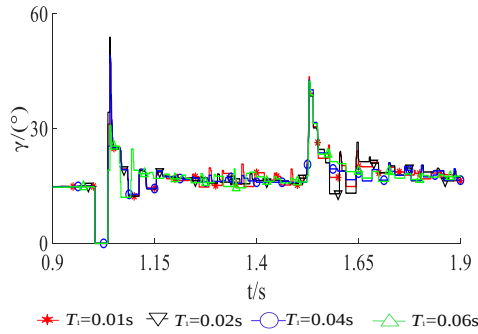


图 A2 三相接地故障下不同 T_1 对 γ 的影响

Fig.A2 Effect of different T_1 on γ under three-phase grounding fault

表 A1 仿真模型参数设置

Table A1 Parameter setting of simulation model

参数	参数值	
	整流侧	逆变侧
交流系统	换流母线电压	382.87 kV
	等效电抗	$47.6 \angle 84^\circ$
	短路比	2.5
换流变压器	容量	603.7 MV·A
	变比	345.0/213.5
	漏抗值	0.18 p.u.

表 A2 直流线路参数

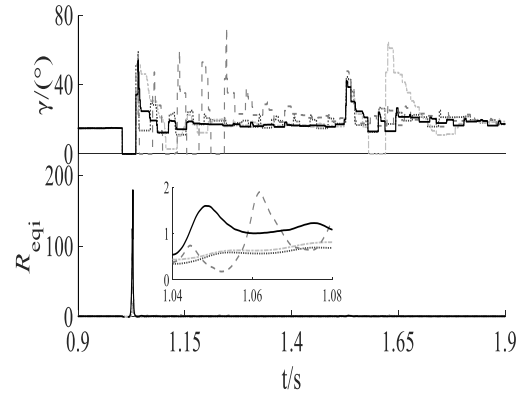
Table A2 DC line parameters

参数	参数值	参数	参数值
额定电压	500 kV	线路电阻	5 Ω
额定功率	1 000 MW	线路电感	0.594 H

表 A3 4 种方案的关键参数设置

Table A3 Key parameter setting of 4 schemes

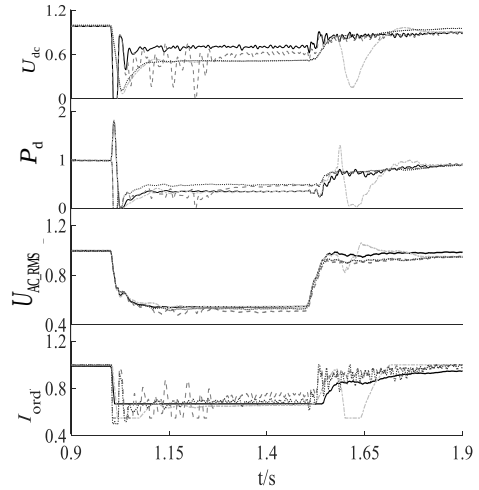
方案	关键参数
1	精确变斜率 VDCOL 曲线部分为 $y=ax^n+b$ (a, b 均为不为 0 的常数且 $n \geq 1.5$), $a=0.762$, $n=4$, $b=0.5$, 虚拟电阻 $R^*=0.75$ p.u.
2	$U_L=0.4$ p.u., $I_{\min}=0.55$ p.u., $U_H=0.9$ p.u., $I_{\max}=1$ p.u.
3	$U_L=0.4$ p.u., $I_{\min}=0.55$ p.u., $U_H=0.9$ p.u., $I_{\max}=1$ p.u., $R^*=0.75$ p.u.
4	$N=2$, $U_{dc}=500$ kV, $I_d=2$ kA, 等效直流输入电阻额定值 $R_{eqN}=250$ Ω



.....①方案1 ---②方案2 ---③方案3 ———④方案4

图 A3 三相接地故障下 γ 与 R_{eqi} 对比

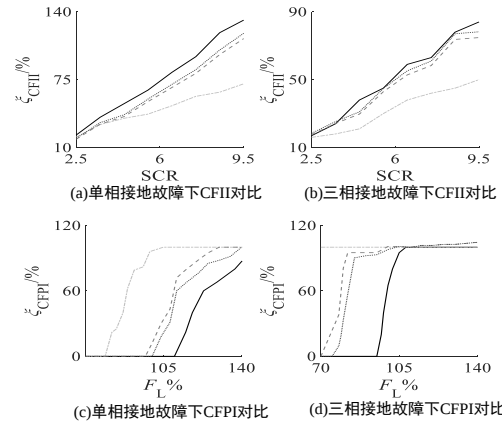
Fig.A3 Comparison of γ and R_{eqi} under single-phase grounding fault



.....①方案1 ---②方案2 ---③方案3 ———④方案4

图 A4 三相接地故障下 U_{dc} 、 P_d 、 U_{AC_RMS} 和 I_{ord} 对比

Fig.A4 Comparison of U_{dc} , P_d , U_{AC_RMS} and I_{ord} under three single-phase grounding fault



.....①方案1 ---②方案2 ---③方案3 ———④方案4

图 A5 4 种方案下不同短路比及不同故障水平时的 ξ_{CFII} 、 ξ_{CFPI} 对比

Fig.A5 Comparison of ξ_{CFII} and ξ_{CFPI} of three control strategies under different SCR and different fault levels