

基于 UPFC 抑制 HVDC 换相失败的控制方法研究

刘建坤¹, 王 蒙², 张宁宇¹, 杨志超²

(1. 国网海上风电并网联合实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院),
江苏 南京 211103; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:针对高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)系统发生换相失败的问题,运用统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)减小 HVDC 系统发生换相失败的概率,并对 UPFC 的原有控制策略进行改善。当系统交流侧发生故障,UPFC 并联侧控制策略采用交流侧母线电压参考值调节方法抑制换相失败的发生。引入故障水平 F_L 来表征 HVDC 系统的故障严重程度,通过理论分析和 PSCAD/EMTDC 仿真验证:当故障水平 F_L 为 18.7% 时,UPFC 原有控制策略与改善后的控制策略均可抑制换相失败的发生;故障水平 F_L 为 23.1% 时,只有改善后的控制策略可有效抑制换相失败的发生;故障更为严重,当故障水平达到 F_L 为 93.56% 时,改善后的控制策略可有效降低连续换相失败的发生概率。运用 UPFC 动态无功补偿能力可增强 HVDC 系统受端交流系统强度,提高换相失败的抵御能力,从而有效改善了 HVDC 系统的运行特性。

关键词:高压直流输电;换相失败;UPFC;PSCAD/EMTDC;故障水平

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)05-0086-06

0 引言

由于我国资源分布不均衡,高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)得到广泛运用并快速发展。与传统输电方式相比, HVDC 系统具有输送相同功率线路造价低、输送容量大、运行可靠、线路有功损耗小等优点,在大区域联网与远距离大容量输电等方面拥有显著优势^[1-2]。换相失败是采用半控型器件晶闸管作换流阀元件的直流系统逆变侧常见故障,交流系统扰动与直流系统自身故障均会导致换相失败发生^[3]。据统计,导致换相失败的大部分原因为交流电网扰动(交流系统故障)。当发生换相失败时,直流系统电压、电流与功率都会发生剧烈波动,对交流系统产生冲击^[4-5]。若不采取必要措施抑制换相失败,紧急情况下将发生直流闭锁,严重威胁电网的安全运行。随着我国投运的高压直流工程逐渐增多,抑制高压直流系统换相失败成为值得关注的首要问题^[6-7]。

目前,国内外学者已对换相失败影响因素及抑制措施做出大量研究。文献[8]分析了7种对换相失败产生影响的因素,但并未针对换相失败的主要因素进行深入探究。文献[9—11]从协调控制、低压限流环节控制、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,但仅利用 HVDC 本身特性抑制换相失败,且抑制效果有限。文献[12]对

HVDC 系统和静止无功补偿器(switching virtual circuit, SVC)协调配合进行研究,并证明 SVC 在抑制后续换相失败中产生作用。但由于 SVC 作为由晶闸管控制的第一代 FACTS 器件,其动态响应时间较长,无功功率受系统电压影响,仅能抑制后续换相失败未能有效降低换相失败发生概率。

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为第三代 FACTS 装置,可看做 STATCOM 与 SSSC 二者的结合,与其他 FACTS 装置相比不但可以快速独立地控制输电线路中的潮流分布,抑制系统阻尼振荡,还能动态补偿系统的无功功率,提高系统的运行特性^[13-16]。目前为解决苏锦直流动态无功支持不足导致换相失败、直流双极闭锁等问题,已在苏州南部安装 500 kV UPFC。UPFC 在电力系统中的主要作用有:(1)电压调节;(2)无功补偿;(3)可控串补;(4)动态移相^[17]。由于 UPFC 在一定程度上可以抑制母线电压振荡,提高电力系统母线电压稳定,将 UPFC 接入高压直流系统可为系统提供动态无功支持,稳定高压直流系统交流侧电压,在一定程度上抑制换相失败的发生。

本文将 UPFC 接入 HVDC 系统逆变侧交流母线,建立一个含 UPFC 的 HVDC 系统模型。推导出 UPFC 串联侧与并联侧功率传输数学模型,在此基础上提出一种对 UPFC 并联侧原有控制策略的改善方法。利用不同故障水平,通过 PSCAD/EMTDC 的仿真验证,证明了 UPFC 并联侧采用新的控制策略后在故障容量较小时可减小 HVDC 系统的换相失

收稿日期:2018-05-09;修回日期:2018-06-19

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助(51607092)

概率,在故障严重的情况可有效抑制换相失败的持续发生,改善 HVDC 系统的运行特性。

1 HVDC 系统模型

在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 1 所示典型 HVDC 模型。该模型中 HVDC 是在国际大电网标准直流测试系统 CIGRE 基础上建立的单极直流模型,可将此系统视为复杂电力系统的简化模型。整流侧控制方式采用最小触发角和定直流电流控制,逆变侧采用最小关断角和直流电流控制。此外, HVDC 系统配备低压限流控制 (VDCOL), 逆变侧还配备有电流偏差控制 (CEC) [18-19]。

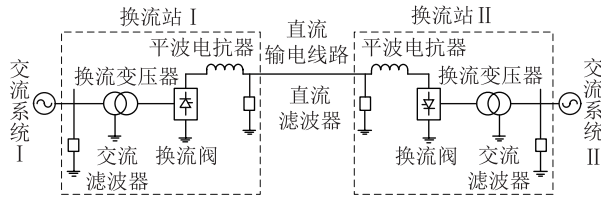


图 1 直流系统模型

Fig.1 Model of HVDC system

HVDC 模型系统参数可由 CIGRE 标准模型得知。其中, HVDC 系统的额定直流电压为 500 kV, 额定容量为 1000 MW, 工频为 50 Hz, 平波电抗器的电感为 1.2 H, 直流线路的电阻为 5 Ω, HVDC 换流站具体参数如表 1 所示 [20]。

表 1 HVDC 换流站主要参数

Tab.1 Primary parameters of HVDC converter			
HVDC 整流侧	交流系统	单台换流变压器	无功补偿容量
整流侧	47.6 ∠ 84° Ω	345/213.5 kV	626 MV·A
	382.87 kV	603.7 MV·A X _T = 0.18	
逆变侧	21.2 ∠ 75° Ω	230/209.2 kV	626 MV·A
	215.05 kV SCR = 2.5	591.8 MV·A X _T = 0.18	

2 含 UPFC 的 HVDC 系统及控制策略

HVDC 系统运行时消耗大量无功功率, 受端交流系统发生故障时无功功率需求增大。接入 UPFC 可以为系统提供无功支持, 提高系统电压稳定性, 减小 HVDC 系统发生换相失败机率。

2.1 含 UPFC 的 HVDC 系统模型

本文含 UPFC 的 HVDC 系统模型如图 2 所示, UPFC 主要由并联变流器 (VSC1)、串联变流器 (VSC2)、直流侧电容等组成。将 UPFC 并联侧变流器并联接入 HVDC 逆变侧交流母线, 提高 HVDC 逆变侧电压稳定性, 减小发生换相失败机率。串联侧

变流器串联接入交流系统, 控制交流系统潮流分布。

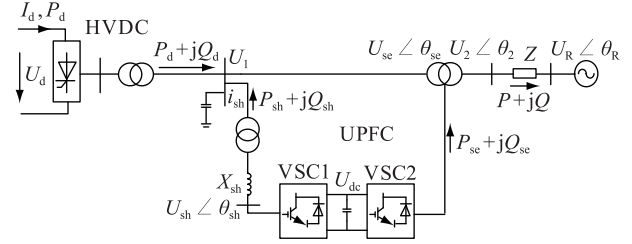


图 2 含 UPFC 的直流系统模型

Fig.2 HVDC system model with UPFC

图 2 中, U_d, I_d 分别为 HVDC 系统直流电压、电流; P_d, Q_d 分别为 HVDC 的有功功率和无功功率; U_1 为 HVDC 受端交流侧母线电压; P_{sh}, Q_{sh} 分别为并联变流器向系统注入的有功功率和无功功率; i_{sh} 为并联侧电流; X_{sh} 为并联侧耦合变压器阻抗; $U_{sh} \angle \theta_{sh}$ 为 VSC1 交流侧电压; U_{dc} 为 UPFC 直流侧电压; $U_{se} \angle \theta_{se}$ 为 VSC2 交流侧电压; U_2 为串联侧出口电压; P, Q 分别为线路有功功率和无功功率; Z 为逆变侧线路等值阻抗; $U_R \angle \theta_R$ 为受端系统等效电压。

文中 UPFC 并联侧采用定交流侧电压与定直流侧电压控制方式, 其中交流侧电压为 HVDC 逆变侧交流母线电压。利用 UPFC 并联侧对无功功率进行快速独立控制的特点, 提高 HVDC 的运行特性, 减少换相失败的概率。UPFC 串联侧采用有功、无功独立控制方式, 可灵活对线路潮流进行控制。

2.2 并联侧 UPFC 控制策略

UPFC 并联侧能够改变接入点电压的幅值与相角, 并对系统进行无功补偿。相位参考值取 U_1 , 由图 2 可得:

$$i_{sh} = i_{shd} + j i_{shq} = \frac{U_1 - U_{sh} \angle \theta_{sh}}{X_{sh}} = \frac{U_1 - u_{shd}}{X_{sh}} + j \frac{u_{shq}}{X_{sh}} \quad (1)$$

$$P_{sh} + j Q_{sh} = U_1 (i_{shd} - j i_{shq}) = \frac{U_1 (U_1 - u_{shd})}{X_{sh}} - j \frac{U_1 u_{shq}}{X_{sh}} \quad (2)$$

式中: i_{shd}, i_{shq} 分别为 dq 坐标变换后 UPFC 并联侧电流的 d, q 轴电流分量。由式 (1), (2) 可知, UPFC 并联侧通过向 HVDC 系统注入无功功率来调节 U_1 的大小, 控制改变 u_{shq} 的大小则可实现改变 i_{shq} 的大小, 从而达到控制并联侧接入点电压的目的。UPFC 并联侧有功功率与直流侧电容电压 U_{dc} 有关, 改变 u_{shd} 的大小即可实现 i_{shd} 大小的改变, 达到控制直流侧电压的目的。

UPFC 并联侧控制策略为外部电压环控制、内部电流环控制。其外部电压环控制方式采用定交流侧电压与定直流侧电压控制方式, UPFC 所控制

的交流侧电压为 HVDC 逆变侧交流母线电压,直流侧电压为 UPFC 直流侧电容电压^[20]。对 UPFC 并联侧外环电压控制中的定交流侧母线电压控制做出改善,提出一种交流侧母线电压参考值调节方法,抑制换相失败。

如图 3 所示, U_1 , U_{1ref} 分别为 UPFC 并联侧交流母线电压与参考值; U_{dc} , U_{dcref} 分别为 UPFC 直流侧电压与参考值; i_{sh} 为 UPFC 并联侧电流; u_{shd} , u_{shq} , i_{shd} , i_{shq} 分别为 dq 坐标变换后 UPFC 并联侧电压、电流的 d 、 q 轴电压、电流分量。原有控制策略中交流侧母线电压参考值已知且给定,现提出交流侧母线电压参考值调节方法,测量 HVDC 系统受端母线电压 U_1 大小,根据母线电压实际测量值 U_1 的变化而调节并联侧交流母线电压参考值 U_{1ref} 。系统稳定运行时 U_1 为系统额定电压,UPFC 的参考值 U_{1ref} 也为额定值;交流系统发生故障,电压 U_1 下降时提高并联侧交流母线电压参考值,使其在系统故障期间参考电压 U_{1ref} 略高于实际电压值 U_1 。增大实际值与参考值的差额,帮助 HVDC 系统在短时间内获得更多无功支持,使系统快速恢复稳定。当 HVDC 系统处于严重故障情况下实际电压值 U_1 处于低电压状态,强补无功将导致 UPFC 系统过流或直流电压失控,此时控制系统将发出闭锁指令,对 UPFC 并联侧无功补偿进行闭锁。

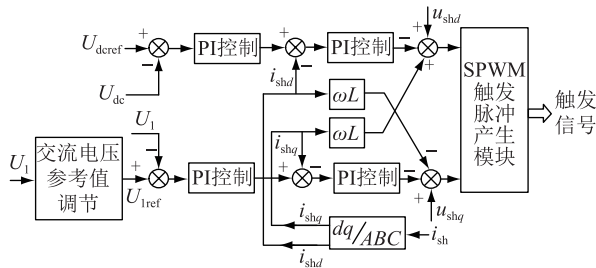


图 3 含有交流电压参考调节环节的 UPFC

Fig.3 Structure of control system for UPFC with a regulation function for AC voltage reference value

考虑到电压波动范围与系统裕量,通过 PSCAD/EMTDC 仿真分析,设计得到交流侧母线电压参考值如式(3)所示。

$$U_{1ref} = \begin{cases} 1.00 & U \geq 0.95 \\ 1.10 & 0.40 \leq U < 0.95 \\ \text{闭锁} & U < 0.40 \end{cases} \quad (3)$$

当故障发生,母线电压 U_1 下降到 0.95 以下时, U_{1ref} 将升高至 1.10;故障更加严重, U_1 下降到 0.40 以下时,并联侧无功补偿将闭锁;故障恢复, U_1 上升至 0.95 以上时, U_{1ref} 将恢复为额定状态(全部为标么值)。

2.3 串联侧控制策略

UPFC 串联侧通过改变 U_{se} 的电压幅值与相角来改变线路的有功功率与无功功率,相位参考值取 U_1 ,设 $\delta = \theta_2 - \theta_R$,由图 2 可得^[21]:

$$U_1 = U_{se} + U_2 \quad (4)$$

$$P + jQ = \frac{U_R U_2}{X_Z} \sin \delta + j \frac{1}{X_Z} (U_2^2 - U_R U_2 \cos \delta) \quad (5)$$

由式(4),(5)可知, U_2 的电压幅值主要影响线路的无功功率传输,而 U_2 与 U_R 的相角差 δ 主要影响线路的有功功率传输。因此,通过控制线路中 U_2 的电压幅与相角差 δ 则可实现对线路中的有功功率和无功功率 U_1 的控制,如图 4 所示实现 UPFC 串联侧控制。

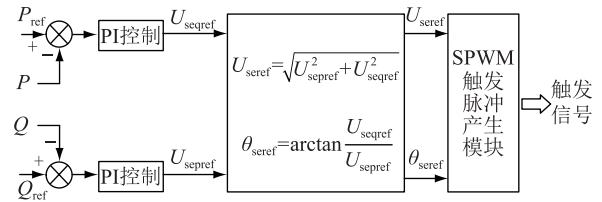


图 4 UPFC 串联侧控制系统结构

Fig.4 Structure of UPFC series side control system

将输出电压 U_{se} 正交分解为 U_{sep} 与 U_{seq} ,且 U_{sep} 主要对无功进行控制, U_{seq} 主要对有功功率进行控制。以线路有功功率与无功功率偏差量作为反馈,利用 PI 调节对线路有功功率与无功功率进行控制。

3 仿真实验及分析

3.1 仿真算例说明

在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 2 所示含 UPFC 的 HVDC 系统模型,系统具体参数如表 1 所示。HVDC 有功功率、逆变侧交流母线电压、直流电流与直流电压的基准值分别为 1000 MW, 230 kV, 2 kA, 500 kV。正常状态下,关断角 $\gamma = 15^\circ$,引入故障水平 F_L 如式(6)所示:

$$F_L = \frac{U_{ac}^2}{Z_f P_{dc}} 100\% \quad (6)$$

式中: U_{ac} 为逆变侧交流母线电压额定值; Z_f 为故障阻抗; P_{dc} 直流系统有功功率。故障水平 F_L 与 HVDC 故障的严重性成正比,故障越严重, F_L 值越大。理论上故障阻抗为零时,故障水平 F_L 达到无穷大。

对于含有 UPFC 的 HVDC 系统,需验证本文提出的利用 UPFC 抑制换相失败的有效性。在 PSCAD/EMTDC 仿真中,设计 HVDC 逆变侧交流母线发生单相经电感接地故障(逆变侧故障中感性接地故障为最常见的故障类型,也是最容易导致换相失败的

故障形态),选择不同故障水平下含 UPFC 的 HVDC 系统。验证 UPFC 对换相失败的抑制作用,继而验证改善控制策略对换相失败的抑制作用。对下列 3 种情况进行仿真分析:

方案一:系统不含 UPFC 的 HVDC 系统;

方案二:系统含有 UPFC 的 HVDC 系统,UPFC 运用原来控制方式;

方案三:系统含有 UPFC 的 HVDC 系统,UPFC 运用改进后控制方式。

3.2 仿真结果分析

选取不同故障水平,配合上述不同控制方式组合成的方案,分别进行仿真分析。

(1) HVDC 逆变侧交流母线在 2 s 时发生单相(a 相)经电感接地故障,故障水平 $F_L = 18.7%$, $Z_f = 282.8 \Omega$,障持续时间为 0.1 s,UPFC 并联侧额定无功容量为 100 Mvar。在故障水平 $F_L = 18.7%$ 的水平下,方案一与方案二有功功率比较如图 5 所示。方案一未安装 UPFC,发生故障时 HVDC 系统发生换相失败,有功功率大幅跌落。方案二中 UPFC 成功抑制 HVDC 系统换相失败的发生,说明在故障容量较小时,UPFC 原有控制策略可以抑制 HVDC 换相失败的发生。

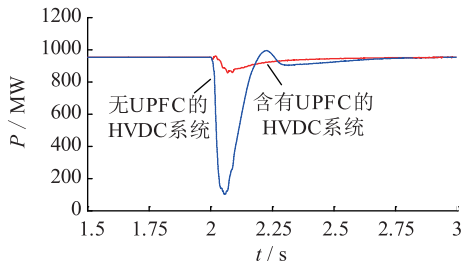


图 5 故障水平 18.7%时方案一与方案二有功功率
Fig.5 Case 1 and case 2 active power and active power drawings under fault level 18.7%

(2) HVDC 逆变侧交流母线在 2 s 时发生单相(a 相)经电感接地故障,故障水平 $F_L = 23.1%$, $Z_f = 229 \Omega$,故障持续时间为 0.1 s,UPFC 并联侧额定无功容量为 100 Mvar。为描述 HVDC 暂态特性,文中定义故障恢复时间为故障清除后 HVDC 系统有功功率恢复到故障发生前有功功率输出值 90%所消耗的时间。

在故障水平 $F_L = 23.1%$ 的水平下,方案一与方案二的有功功率比较如图 6 所示。方案二中 UPFC 虽然未能抑制 HVDC 系统换相失败的发生,但可以改变系统故障恢复特性,缩短故障恢复时间。

相同的故障水平下将方案一与方案三的仿真进行比较,如图 7 所示。图 7(a)为在故障水平 23.1%时 HVDC 系统不加任何改善措施(不加入

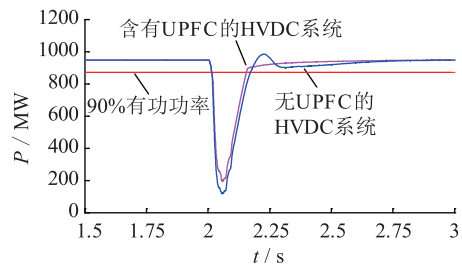


图 6 故障水平 23.1%时方案一与方案二有功功率
Fig.6 Case 1 and case 2 active power and active power drawings under fault level 23.1%

UPFC 装置)的运行特性。故障后系统逆变侧母线电压波动严重,线路有功功率与直流电压下降剧烈,直流电流骤然上升,关断角 γ 跌落为 0,系统换相失败发生。

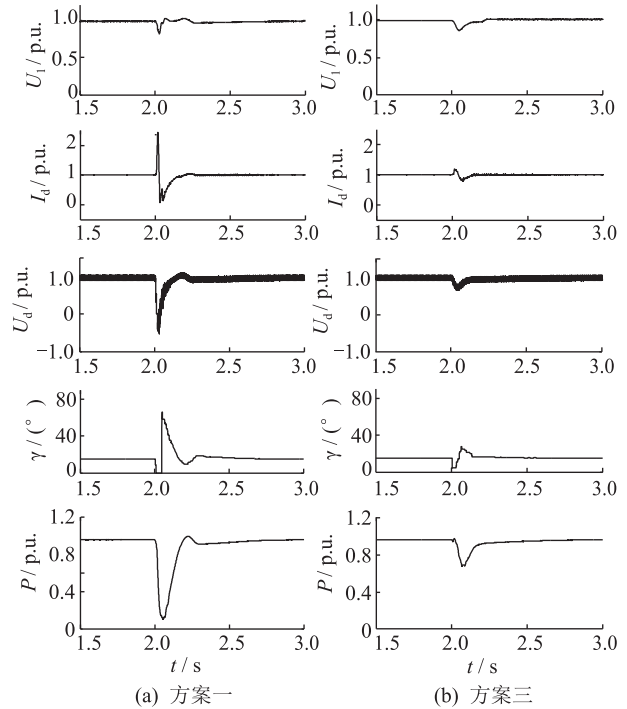


图 7 故障水平 23.1%时 HVDC 系统运行特性
Fig.7 System operation performance under fault level 23.1%

在故障水平 23.1%时,将改善控制策略的 UPFC 运用于 HVDC 系统。图 7(b)与图 7(a)相比,由于在故障发生后加入电压参考值调节措施,UPFC 可以提供更多无功支持,稳定逆变侧母线电压,抑制线路有功功率大幅跌落,对系统换相失败产生预防作用。说明采用新的 UPFC 控制策略可以抑制 HVDC 系统换相失败的发生。

(3) HVDC 逆变侧交流母线在 2 s 时发生单相(a 相)经电感接地故障,故障水平 $F_L = 93.56%$, $Z_f = 56.5 \Omega$,故障持续时间为 0.1 s,UPFC 并联侧额定无功容量为 100 Mvar。在此故障水平下将方案一与

方案三的仿真进行比较如图 8 所示。由图 8(a) 可知,在故障程度进一步加重,故障水平达到 93.56%,方案一中 HVDC 系统发生两次换相失败,HVDC 有功功率与逆变侧母线电压持续跌落,对系统造成严重冲击。图 8(b) 所示在 HVDC 系统引入改善控制策略的 UPFC 装置,方案三中改善控制策略的 UPFC 装置对 HVDC 系统的换相失败起到了一定的抑制作用。安装 UPFC 装置后,HVDC 系统故障产生的换相失败从原有的两次减少为一次,抑制了持续换相失败的发生,大大改善了系统的运行特性。

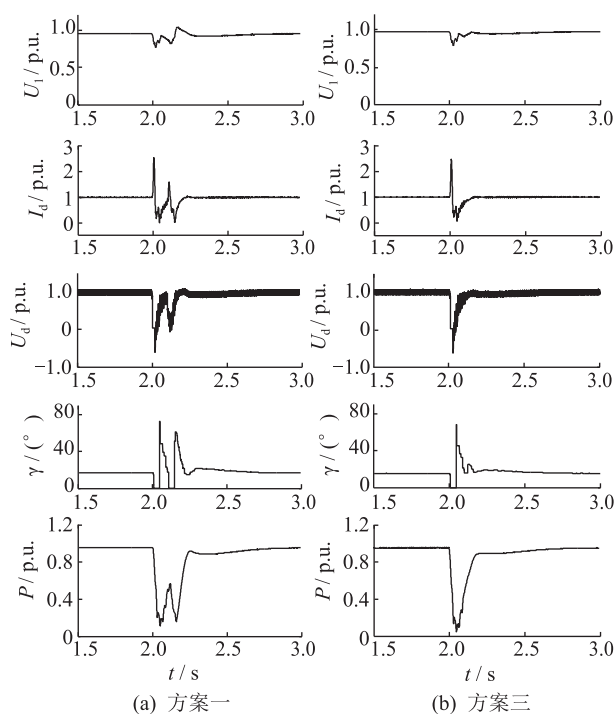


图 8 故障水平 93.56% 时 HVDC 系统运行特性

Fig.8 System operation performance under fault level 93.56%

(4) HVDC 逆变侧交流母线在 2 s 时发生单相(a 相)经电感接地故障,故障水平 $F_L = 421\%$, $Z_f = 12.57 \Omega$,故障持续时间为 0.1 s,此时交流故障电压降落至 70%左右,UPFC 并联侧额定无功容量为 100 Mvar。方案一与方案三的仿真比较如图 9 与所示。

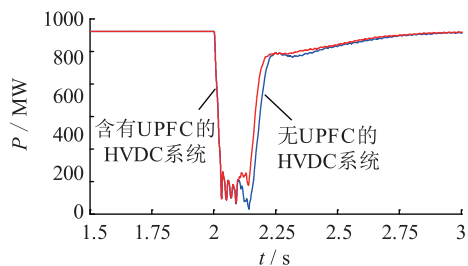


图 9 故障水平 421% 时方案一与方案三有功功率

Fig.9 Case 1 and case 3 active power and active powerdrawings under fault level 421%

当故障程度极为严重时,方案一未安装 UPFC 装置有功功率瞬时大幅跌落至 0 附近,故障结束后缓慢恢复。方案三中前期由于故障较为严重有功功率变化与方案一一样,但在故障结束后有功功率恢复正常状态所用时间明显短于方案二。说明在故障程度极为严重情况下 UPFC 装置加入可以帮助系统更快地恢复正常运行。

4 结语

本文研究了含 UPFC 的 HVDC 系统,在 PSCAD/EMTDC 中建立了仿真模型,研究了其控制策略并在原有控制方法下提出了一种新的 UPFC 并联侧控制策略。在故障发生时提高 UPFC 并联侧交流母线电压参考值,为 HVDC 系统提供更多无功支持,故障结束后电压参考值恢复为额定值。该控制策略在故障水平较低时能够抑制 HVDC 系统换相失败的发生,在故障水平较高时可有效降低连续换相失败的概率,增强 UPFC 对 HVDC 的电压支撑能力,提高 HVDC 系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14):1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14):1-3.
- [2] 林家生. 高压直流输电[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1982.
LIN Jiasheng. High voltage direct current transmission[M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 1982.
- [3] 郝跃东, 倪汝冰. HVDC 换相失败影响因素分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9):38-41.
HAO Yuedong, NI Rubing. Analysis on influence factors of commutation failure in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9):38-41.
- [4] 苏寅生, 陈董秀, 鲍颜红, 等. 应对直流连续换相失败的紧急控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4):126-131.
SU Yinsheng, CHEN Dongxiu, BAO Yanhong, et al. An emergency control strategy coping with continuous commutation failure in DC system[J]. Power System Protection & Control, 2017.
- [5] 王增平, 刘席洋, 李林泽, 等. 多馈入直流输电系统换相失败边界条件[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10):12-19.
WANG Zengping, LIU Xiyang, LI Linze, et al. Boundary conditions of commutation failure in multi-infeed HVDC systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10):12-19.
- [6] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transac-

- tions on Power Delivery, 2010, 26(1):378-384.
- [7] 袁 阳, 卫志农, 雷 霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11):140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):140-147.
- [8] 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.
- [9] 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 systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11):63-66.
- [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, 83.
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, LIN Lingxue. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10):79-82, 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] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于RTDS仿真的MMC_UPFC串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16):56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbin, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC-UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection & Control, 2016, 44(16):56-62.
- [14] 吴 俊, 方 芳, 赵晓明. 柔性直流输电舟山换流站无源HVDC启动试验中典型故障分析[J]. 浙江电力, 2016, 35(1):6-9.
WU Jun, FANG Fang, ZHAO Xiaoming. Analysis on typical faults in passive HVDC startup tests in Zhouyang VSC-HVDC converter station[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1):6-9.
- [15] 周正宇, 王海潜, 祁万春, 等. 基于灵敏度的UPFC选址研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1):33-36.
ZHOU Zhengyu, WANG Haiqian, QI Wanchun, et al. Optimal UPFC locating based on sensitivity analysis [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):33-36.
- [16] 和 萍, 耿斯涵, 姚依林, 等. UPFC改善含风电电力系统阻尼特性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):208-213.
HE Ping, GENG Sihan, YAO Yilin, et al. Analysis of damping characteristics improvement by UPFC for power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):208-213.
- [17] 王海潜, 祁万春, 乔黎伟, 等. UPFC三节点功率注入模型及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18):145-151.
WANG Haiqian, QI Wanchun, QIAO Liwei, et al. A three-bus power injection model of UPFC and its engineering application [J]. Power System Protection & Control, 2016, 44(18):145-151.
- [18] 陈 珩, 陈 怡, 万秋兰, 等. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
CHEN Heng, CHEN Yi, WAN Qiulan, et al. Steady-state analysis of electric power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [19] 赵成勇, 李 丹, 刘羽超, 等. 含有STATCOM的高压直流输电系统控制方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8):2440-2448.
ZHAO Chengyong, LI Dan, LIU Yuchao, et al. Control method for HVDC system with STATCOM [J]. High voltage technology, 2014, 40(8):2440-2448.
- [20] GUO C Y, ZHAO C Y. Novel control strategy for voltage source converter based HVDC and controller parameters optimization[J]. Proceedings of the Csee, 2010, 30(15):1-9.
- [21] 朱鹏程, 刘黎明, 刘小元, 等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1):45-51.
ZHU Pengcheng, LIU Liming, LIU Xiaoyuan, et al. Analysis and study on control strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):45-51.

作者简介:



刘建坤

刘建坤(1980—),男,硕士,研究员级高级工程师,从事 FACTS 技术在电网中的应用与电力系统优化调度工作;

王 蒙(1991—),男,硕士研究生,研究方向为柔性交直流输电(E-mail: 15195869986@163.com);

张宁宇(1985—),博士,高级工程师,从事电网规划与运行,柔性输电技术相关工作。

(下转第 120 页)

Analytical Method of the Industry Which Public Transformers Belong Based on Load Data Mining

FANG Chao, ZHONG Chunlin, JI Cong

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co.,Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to effectively analyze the economic benefits of investment of the electricity distribution network from the perspective of the characteristics of the public transformer industry, it is necessary to classify the industry of public transformers. In this paper, the use of big data technology to analyze the industry load characteristics, and then the improved K -means algorithm based on canopy is used to analyze the characteristics of the public transformer load. After that, according to the cosine similarity algorithm, from the perspective of the characteristics of the four seasons load and the characteristics of holiday load, the analysis of public transformers belong to which industry. Finally, the industry fitting method from different dimensions is used to match the industry which public transformers belong. For public transformers in Jiangsu province, the use of the method has been achieved after the high accuracy rate, to achieve a more accurate analytical method of the public transformers industry. The analytical method of the industry which public transformers belong based on load data mining provide a strong support for the evaluation of economic benefits of investment of the electricity distribution network.

Key words: load characteristic; load clustering; industry partition

(编辑 钱悦)

(上接第 91 页)

The Control Method of HVDC Commutation Failure Based on UPFC

LIU Jiankun¹, WANG Meng², ZHANG Ningyu¹, YANG Zhichao²

(1. State Grid Offshore Wind Power Grid Joint Laboratory(State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd. Research Institute), Nanjing 211103,China; 2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology,Nanjing 211167,China)

Abstract: Aiming at the problem of commutation failure in high voltage direct current (HVDC) transmission system, the unified power flow controller(UPFC) is applied to reduce the probability of commutation failure of HVDC system, and improve the original control strategy of the unified power flow controller. When the AC side faults, UPFC shunt control strategy using AC bus voltage reference value adjustment method to suppress commutation failure. The severity of fault is introduced into the fault level FL to characterize the HVDC system, through theoretical analysis and simulation verification of PSCAD/EMTDC; When the fault level of $F_L = 18.7\%$, which can control the original control strategy and improvement strategy of UPFC inhibition after commutation failure; fault level $F_L = 23.1\%$, only the improved control strategy can effectively inhibit the occurrence of commutation failure; failure is more serious, when the fault level reached $F_L = 93.56\%$, the improved control strategy can effectively reduce the probability of occurrence of continuous commutation failure. Reactive power compensation can be affected by AC system strength enhanced HVDC system using UPFC dynamic, improve the commutation failure resistance, thereby effectively improving the operation performance of HVDC system.

Key words: HVDC; commutation failure; UPFC; PSCAD/EMTDC; fault level

(编辑 钱悦)