

基于附加信号的 VSC-HVDC 系统 改进有功功率控制策略

任敬国¹, 李可军¹, 牛林², 赵建国^{1,2}, 于大洋¹, 任敬刚³, 梁永亮¹

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002;

3. 东营供电公司, 山东 东营 257091)

摘要: 为了保证大扰动情况下电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)系统的直流电压控制和有功功率平衡,提出了一种基于附加信号的有功功率控制策略。首先简要地分析了故障情况下 VSC-HVDC 系统的有功功率平衡和直流电压变化特点;然后给出了改进有功功率控制器的功率特性曲线,推导了定有功功率控制端直流电压最大工作范围的计算公式;接着提出了外环有功功率控制器的设计方法,推导了有功功率修正值的计算公式,并分析了该控制器在正常运行和故障 2 种情况下的工作原理。PSCAD/EMTDC 仿真研究表明,在电网电压跌落或主导换流站停运等暂态扰动情况下,所提控制策略能够维持直流电压在安全运行范围内。

关键词: 电压源型换流器; 高压直流输电; 柔性直流输电; 功率控制; 电压控制

中图分类号: TM 721.1; TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.008

0 引言

电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)技术具有多种优点,如能够实现有功功率和无功功率的独立控制,具有动态无功补偿能力,改善电能质量,向无源网络供电以及易实现多端直流输电等^[1-4]。因此,VSC-HVDC 技术非常适用于风电场并网、孤岛供电、交流系统的非同步互联、电力市场交易以及多端直流输电等领域^[5-8],具有广阔的应用前景。

为了维持有功功率平衡,VSC-HVDC 系统的一侧换流站必须采用定直流电压控制(DCVC),称之为主导换流站。当主导站的交流侧电网发生故障时,电网电压跌落导致主导站输出相同功率需要更大的电流;同时,鉴于限流器的作用,电网电压跌落导致主导站实际用于维持有功功率平衡的容量减小。若故障前主导站输送的有功功率值与故障后电网电压的比值大于一定值,主导站将进入限流模式,系统直流电压失去控制;最严重的情况是主导站因内部故障停运,系统完全失去了直流电压控制的能力。由于两侧换流站间没有通信,或虽然采用了通信但存在一定的延时,定有功功率控制(APC)换流站仍按照参考值进行有功功率的输送,引起直流电压迅速上升或下降,最终导致直流过电压或欠电压保护装置动作,使 VSC-HVDC 系统被迫停运。

VSC-HVDC 系统的直流电压控制问题受到了广泛的关注和研究。文献[9]提出了一种新型广义直流电压控制策略,将 APC 换流站的外环有功功率控制器设计为一种广义直流电压控制器,有效地解决了上述问题,但其控制器中的 PI 环节偏多,参数调试比较困难。文献[10-12]提出了采用滞环控制的模式切换控制策略,给出了该控制策略的设计与参数计算方法,并验证了不同运行方式和故障情况下该策略的有效性。文献[13]将依赖于直流电压的电流指令限制单元(VDCCOL)引入到 VSC-HVDC 系统中,较好地解决了故障期间系统的直流电压控制问题。在此基础上,本文提出了一种更容易实现的、可自动适应正常与故障状态的改进有功功率控制策略,即在外环有功功率参考值中加入了依赖于本地直流电压的修正值信号,从而实现故障期间有功功率的平衡,保证直流电压在安全范围内。

1 VSC-HVDC 系统的结构与原理

联接有源交流系统时 VSC-HVDC 系统示意图见图 1, P_1 和 i_1 分别为交流电网流入换流站 1 的有功功率和电流, P_{dc1} 和 I_{dc1} 分别为换流站 1 流入直流线路的直流功率和电流, U_{dc1} 和 U_{dc2} 分别为换流站 1 和换流站 2 的直流电压, R_d 和 L_d 分别为直流线路的等效电阻和电感。由于优秀的过电流控制能力,基于同步旋转坐标系的双环矢量控制^[14-15]在实际工程中得到了广泛的应用,本文也采用此方式。为研究方便,假设换流站 1 采用 APC 来控制有功功率的传送(APC 换流站),换流站 2 采用 DCVC 来维持直流电压稳定(主导换流站)。

收稿日期:2012-06-19;修回日期:2013-04-23

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM033);山东省科技发展计划项目(2011GGX10405,2012GQX20115,sf003)

Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2010EM033) and Shandong Scientific and Technological Project, China(2011GGX10405,2012GQX-20115,sf003)

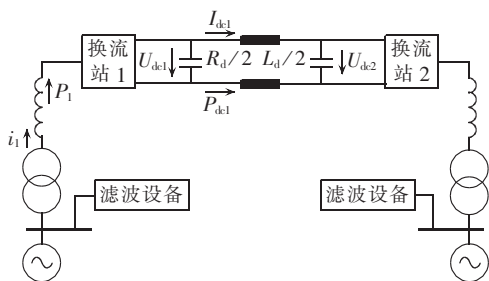


图 1 VSC-HVDC 系统示意图

Fig.1 Block diagram of VSC-HVDC system

VSC-HVDC 系统的直流电压波动本质上是直流侧电容和线路的充/放电功率不平衡所引起的,即两端换流站的有功功率以及系统有功损耗的不平衡。当直流电容器和线路储存的能量增大时,直流电压也随之上升。主导站作为直流系统的有功功率平衡节点,当其进入限流模式或因故障停运时,系统无法维持有功功率平衡,因此失去了对直流电压的控制,此时需要 APC 换流站实现有功功率的平衡,提供直流电压控制能力。

2 改进控制器的功率特性曲线

2.1 功率特性曲线

当 APC 换流站工作于整流状态时,主导站停运或进入限流模式会导致从直流系统汲取的有功功率减少,直流电压上升,此时,APC 换流站需要减少充电功率;反之,APC 换流站需要减少放电功率。因此,可基于直流电压的变化特点,相应地改变故障期间 APC 控制器的有功功率参考值^[16-17],以保持故障期间的有功功率平衡,故本文提出的有功功率控制器功率特性曲线如图 2 所示。右侧曲线为 APC 换流站工作于整流状态时的特性曲线,左侧曲线为其工作于逆变状态时的特性曲线。

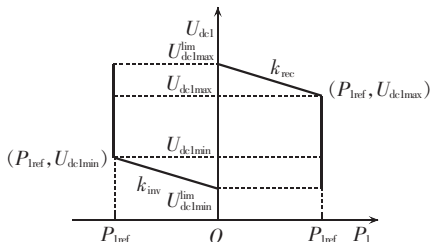


图 2 有功功率控制器的功率特性曲线

Fig.2 Power characteristic curve of active power controller

图 2 中, \$P_{ref}\$ 为 APC 换流站的有功功率参考值, \$[U_{dc1min}, U_{dc1max}]\$ 为直流电压最大工作范围, \$[U_{dc1min}^{lim}, U_{dc1max}^{lim}]\$ 为安全电压范围, \$k_{rec}\$ 和 \$k_{inv}\$ 分别为整流和逆变状态下功率特性曲线的斜率。相比于自动限制有功电流参考值,该方法的控制响应偏慢,但实现起来比较简单,且其控制响应时间能够满足直流电压控

制的要求。

2.2 直流电压最大工作范围的求取

安全电压范围 \$[U_{dc1min}^{lim}, U_{dc1max}^{lim}]\$ 可以根据开关器件和电容器等设备的安全电压来确定;直流电压最大工作范围 \$[U_{dc1min}, U_{dc1max}]\$ 则需要根据直流系统参数和指令值来进行计算,且需要考虑一定的裕度值以防止计算误差影响控制器的正常运行。

根据基尔霍夫电压定律,对直流线路有:

$$R_d I_{dc1} + L_d \frac{dI_{dc1}}{dt} = U_{dc1} - U_{dc2} \quad (1)$$

在正常稳定状态下,忽略直流线路的谐波分量而仅考虑直流分量,则直流电流 \$I_{dc1}\$ 为常数,故:

$$R_d I_{dc1} = U_{dc1} - U_{dc2} \quad (2)$$

由上式知,APC 换流站的直流功率 \$P_{dc1}\$ 可表示为:

$$P_{dc1} = U_{dc1} I_{dc1} = U_{dc1} \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{R_d} \quad (3)$$

假设稳态时主导站始终处于 DCVC 模式,未进入限流模式且直流电压参考值不变,则 \$U_{dc2}\$ 可视为常数。忽略 APC 换流站的损耗,得^[10]:

$$P_{dc1} = P_1 = \frac{3}{2} U_s i_{ld} \quad (4)$$

其中, \$U_s\$ 为 APC 换流站侧交流相电压幅值; \$i_{ld}\$ 为电抗器电流的有功分量,其取值范围取决于 APC 换流站的有功电流限流器设计,见式(5)。

$$i_{ld} \in [i_{ldmin}, i_{ldmax}] \quad (5)$$

联合式(3)—(5)即可解出 APC 换流站的直流电压工作范围。为了防止计算误差导致正常运行状态下修正值不为零,引入裕度值 \$\sigma\$,使直流电压工作范围的计算结果增大 \$2\sigma\$,以保证有功功率控制的精确度。

3 基于附加信号的有功功率控制

3.1 外环控制器设计

为实现如图 2 所示的直流电压-功率特性,本文给出了相应的外环有功功率控制器设计方法,见图 3。其中, \$\Delta P_{ref}\$ 为有功功率修正值, \$i_{ldref}\$、\$i_{ldmax}\$ 和 \$i_{ldmin}\$ 分别为 APC 换流站的电抗器电流 \$i_l\$ 有功分量的参考值、最大值和最小值。

\$\Delta P_{ref}\$ 计算模块通过对变量 \$U_{dc1}\$、\$P_{ref}\$ 和常量 \$U_{dc1min}^{lim}\$、\$U_{dc1max}^{lim}\$、\$U_{dc1min}^{lim}\$、\$U_{dc1max}^{lim}\$ 进行计算从而得到有功功率修正值 \$\Delta P_{ref}\$,并附加到有功功率参考值上,以实

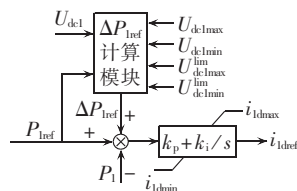


图 3 外环有功功率控制器

Fig.3 Outer-loop active power controller

时地控制换流站的有功功率输出。

3.2 有功功率修正值的计算

由图 2 知,在正常情况下,APC 换流站有功功率修正值应为 0,即:

$$\Delta P_{\text{lref}} = 0 \quad U_{\text{dc1min}} < U_{\text{dc1}} < U_{\text{dc1max}} \quad (6)$$

当 APC 换流站运行于整流状态时,若主导站失去直流电压控制能力,系统直流电压上升且满足 $U_{\text{dc1}} > U_{\text{dc1max}}$,根据线性定律,得:

$$k_{\text{rec}} = \frac{U_{\text{dc1}} - U_{\text{dc1max}}}{\Delta P_{\text{lref}}} = \frac{U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}} - U_{\text{dc1max}}}{0 - P_{\text{lref}}} \quad (7)$$

整理上式,得:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{lref}} = \frac{U_{\text{dc1}} - U_{\text{dc1max}}}{k_{\text{rec}}} \\ \frac{1}{k_{\text{rec}}} = \frac{-P_{\text{lref}}}{U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}} - U_{\text{dc1max}}} \end{cases} \quad U_{\text{dc1max}} < U_{\text{dc1}} < U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}} \quad (8)$$

式(8)即为整流状态下 APC 换流站有功功率修正值 ΔP_{lref} 的计算公式。同理,逆变状态下 ΔP_{lref} 的计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{lref}} = \frac{U_{\text{dc1}} - U_{\text{dc1min}}}{k_{\text{inv}}} \\ \frac{1}{k_{\text{inv}}} = \frac{-P_{\text{lref}}}{U_{\text{dc1min}}^{\text{lim}} - U_{\text{dc1min}}} \end{cases} \quad U_{\text{dc1min}}^{\text{lim}} < U_{\text{dc1}} < U_{\text{dc1min}} \quad (9)$$

因此,由式(6)、(8)、(9)可以得到 ΔP_{lref} 计算模块的实现方法,如图 4 所示。其中, $P_{\text{direction}}$ 取决于 APC 换流站的有功功率参考值:若 $P_{\text{lref}} > 0$,则 $P_{\text{direction}} = 1$;反之, $P_{\text{direction}} = 0$ 。

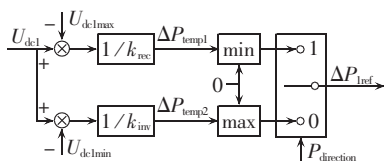


图 4 有功功率修正值的计算

Fig.4 Calculation of active power correction

3.3 工作原理分析

以换流站 1 工作于整流状态为例进行说明, $P_{\text{lref}} > 0$, 则 $P_{\text{direction}} = 1$, 此时有功功率从换流站 1 流向换流站 2, 换流站 2 工作于逆变状态。

正常工作情况下,换流站 1 的有功功率控制器工作于如图 2 所示的右侧功率特性曲线上,且有以下不等式成立:

$$\begin{cases} U_{\text{dc1min}} < U_{\text{dc1}} < U_{\text{dc1max}} < U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}} \\ \frac{1}{k_{\text{rec}}} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(8)和式(10)可知:

$$\Delta P_{\text{temp1}} = \frac{U_{\text{dc1}} - U_{\text{dc1max}}}{k_{\text{rec}}} > 0 \quad (11)$$

由图 4 知, P_{temp1} 与 0 进行求最小值运算,其结果为 0,即 $\Delta P_{\text{lref}} = 0$,则有功功率指令值没有修正,保证了正常运行状态下有功功率控制不受修正值计算环

节的影响。

当换流站 2 侧交流系统发生接地故障时,电网电压跌落使得输出相同的功率需要更大的电流,因此换流站 2 进入限流模式,导致其向交流系统输送的有功功率下降(下降程度取决于并网点处的电压幅值以及换流器限流范围)。由于有功功率不平衡,直流电容开始充电,直流电压失去控制并开始上升。更为严重的情况是换流站 2 因内部故障紧急停运,闭锁触发脉冲或者断开与交流系统的电气联系导致其向交流系统输送的有功功率下降为零,直流电压迅速上升。

在以上 2 种故障情况下,换流站 1 采用基于修正信号的有功功率控制策略,通过检测本地直流电压信号计算得到有功功率修正值。当本地直流电压满足不等式 $U_{\text{dc1}} > U_{\text{dc1max}}$ 时,由式(8)和式(10)可知:

$$\Delta P_{\text{temp1}} = \frac{U_{\text{dc1}} - U_{\text{dc1max}}}{k_{\text{rec}}} < 0 \quad (12)$$

由图 4 知, ΔP_{temp1} 与 0 进行求最小值运算,其结果为 ΔP_{temp1} ,即 $\Delta P_{\text{lref}} = \Delta P_{\text{temp1}} \circ \Delta P_{\text{lref}}$ 附加到原有功率指令值上,则实际的有功功率指令值减小,并且随着直流电压的升高,有功功率指令值减小的幅度逐渐增大,直至直流系统的有功功率平衡为止,最终直流电压稳定在 $[U_{\text{dc1max}}, U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}}]$ 范围内的某一工作点,这样就保证了故障期间有功功率平衡和直流电压控制。

换流站 1 工作于逆变状态时,改进控制器的工作原理类似,故不再赘述。

4 仿真实验

为验证上文提出的控制策略,本文在 PSCAD/EMTDC 环境中建立了如图 1 所示的 VSC-HVDC 系统仿真模型,模型参数选择如下:额定直流电压 1 kV,交流系统线电压有效值 400 V,电抗器电感 5 mH,电抗器电阻 0.2 Ω,直流电容器 2000 μF,直流线路等效电阻 $R_d = 2 \Omega$,直流线路等效电感 $L_d = 20 \text{ mH}$,开关频率 4950 Hz,换流站 1 侧有功电流限流 -31~31 A,换流站 2 侧有功电流限流 -41~41 A。

根据式(3)—(5)计算得到换流站 1 直流电压的工作范围(单位 kV)为:

$$U_{\text{dc1}} \in [0.9686, 1.0295] \quad (13)$$

取裕度值 $\sigma = 0.02 \text{ kV}$,则:

$$\begin{cases} U_{\text{dc1min}} = 0.9486 \text{ kV} \\ U_{\text{dc1max}} = 1.0495 \text{ kV} \end{cases} \quad (14)$$

考虑设备的安全电压限制和低压过电流限制,得到:

$$\begin{cases} U_{\text{dc1min}}^{\text{lim}} = 0.85 \text{ kV} \\ U_{\text{dc1max}}^{\text{lim}} = 1.15 \text{ kV} \end{cases} \quad (15)$$

算例 1:换流站 1 处于整流状态且 $P_{\text{ref}}=12\text{ kW}$,换流站 2 的直流电压参考值为 1 kV 。1 s 时刻,换流站 2 侧交流电网发生三相接地短路故障,故障持续 0.15 s 后切除,仿真结果如图 5 所示。

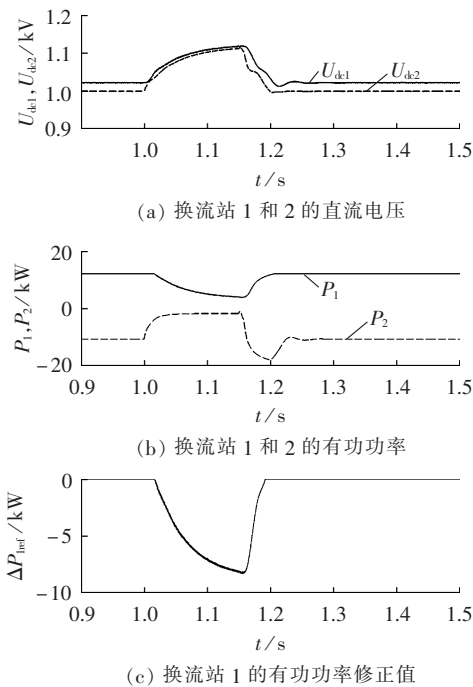


图 5 算例 1 的仿真结果

Fig.5 Simulative results of case 1

由图 5(a)、(b)知:故障前,换流站 1 的有功功率维持在 12 kW ,直流侧电压维持在 1.023 kV ;故障初期 1~1.017 s,由于换流站 1 向直流侧注入的有功功率大于换流站 2 吸收的有功功率,直流电容充电,直流电压开始上升;换流站 1 的直流电压在 1.017 s 左右达到 1.0495 kV ,此后,附加控制环节开始作用,计算得到有功功率修正值,并使换流站 1 有功功率迅速减小。因此,故障期间直流电压被维持在 1.12 kV 以下,防止了直流过电压的出现。故障清除后,换流站 2 恢复了直流电压控制能力,由图 5(b)可知,1.15 s 故障清除后,换流站 2 从直流系统吸收的有功功率迅速增加,将直流系统多余的能量回馈到交流网络,直至直流电压恢复到正常水平。故障清除后,VSC-HVDC 系统恢复到故障前运行状态,安全地度过了故障过程。

算例 2:换流站 1 处于逆变状态且 $P_{\text{ref}}=-12\text{ kW}$,换流站 2 的直流电压参考值为 1 kV 。1 s 时刻,换流站 2 侧交流电网发生三相接地短路故障,故障持续 0.15 s 后切除,仿真结果如图 6 所示。

由图 6(a)、(b)知:故障前,换流站 1 直流侧电压维持在 0.975 kV ;故障初期 1~1.012 s,换流站 2 有功功率迅速下降而换流站 1 的有功功率不变,直流电容放电,导致直流电压快速下降;换流站 1 的直流电压在 1.012 s 左右达到 0.9486 kV ,此后,附加控制环

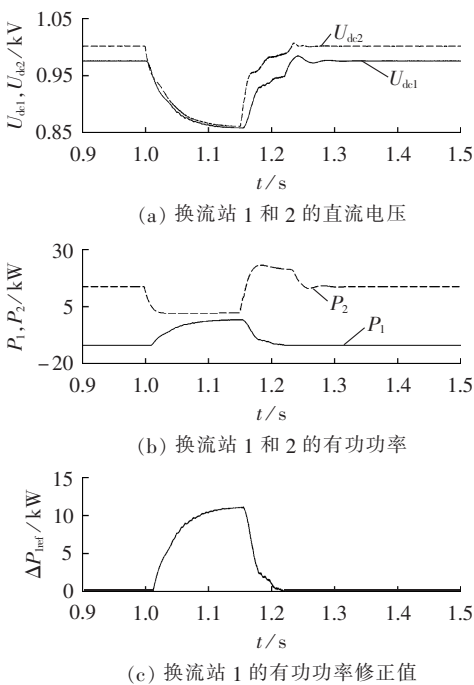


图 6 算例 2 的仿真结果

Fig.6 Simulative results of case 2

节开始作用并使得换流站 1 从直流系统吸收的有功功率迅速减小。因此,故障期间直流电压被维持在 0.86 kV 以上,防止了直流欠电压的出现。由图 6(b)知,1.15 s 故障清除后,换流站 2 恢复了直流电压控制能力,有功功率迅速增加,从交流网络吸收能量用于直流电容充电,直至直流电压恢复到正常水平。故障清除后,VSC-HVDC 系统恢复到故障前运行状态。

算例 3:换流站 1 处于整流状态且 $P_{\text{ref}}=12\text{ kW}$,换流站 2 的直流电压参考值为 1 kV 。1 s 时刻,换流站 2 断开与交流电网的电气联系且闭锁触发脉冲,仿真结果如图 7 所示。

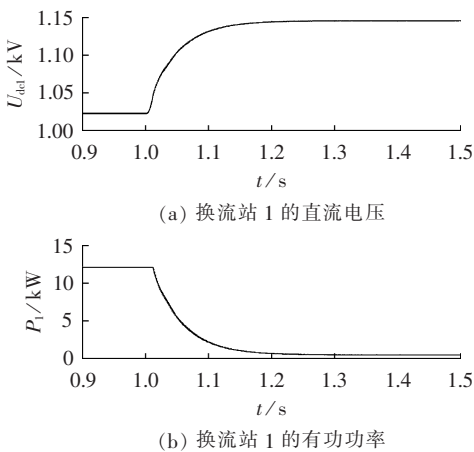


图 7 算例 3 的仿真结果

Fig.7 Simulative results of case 3

由图 7 知:故障初期 1~1.013 s,换流站 2 闭锁并断开与交流系统的联系后,换流站 1 有功功率保持不变,直流电压开始迅速上升;1.013 s 左右,附加控

制环节开始作用,有功功率指令值迅速下降,直流系统的有功功率不平衡度也随之减缓,因此,直流电压的上升逐渐趋于平缓,并最终稳定在 1.145 kV 左右;换流站 1 的有功功率稳定在 0.5 kW,仅用于维持直流系统电压。由此可见,附加控制策略保证了主导站停运情况下的直流电压控制和系统非故障设备的持续并网运行。

5 结论

本文提出了一种更容易实现的、基于附加信号的 VSC-HVDC 系统有功功率控制策略。该策略根据本地直流电压计算得到有功功率修正值并附加到指令值中,以达到维持有功功率平衡的目的,从而减少故障时系统直流侧过电压和欠电压现象,保证了故障期间直流系统的持续、安全和稳定运行,提高了故障后 VSC-HVDC 系统的快速恢复能力。PSCAD/EMTDC 仿真结果表明,本文提出的控制策略能够维持正常情况和故障期间 VSC-HVDC 系统的直流电压控制,具有良好的响应特性。

参考文献:

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [4] 陈谦, 唐国庆, 潘诗锋. 采用多点直流电压控制方式的 VSC 多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 10-15.
CHEN Qian, TANG Guoqing, PAN Shifeng. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 10-15.
- [5] FELTES C, WREDE H, KOCH F W, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [6] XU Lie, YAO Liangzhong, SASSE Chistian. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.
- [7] DU Cuiqing. VSC-HVDC for industrial power systems[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2007.
- [8] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等. 基于 $N-1$ 准则的 VSC-MTDC 输电系统稳态调控方案[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 74-80.
REN Jingguo, LI Kejun, ZHAO Jianguo, et al. $N-1$ principle based steady-state control of VSC-MTDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 74-80.
- [9] 张静, 徐政, 潘武略. VSC-HVDC 系统新型广义直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 46-50.
ZHANG Jing, XU Zheng, PAN Wulue. A novel generalized DC voltage control strategy for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 46-50.
- [10] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Hairong. Control and protection of VSC based HVDC system under AC system fault condition[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [11] 周国梁. 基于电压源换流器的高压直流输电系统控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
ZHOU Guoliang. Research on control strategies of voltage source converter based HVDC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [12] 任敬国, 赵建国, 于大洋, 等. VSC-HVDC 输电系统模式切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 69-73, 111.
REN Jingguo, ZHAO Jianguo, YU Dayang, et al. Mode switching control strategy for VSC-HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 69-73, 111.
- [13] 张静, 徐政, 王峰. 包含 VDCCOL 的 VSC-HVDC 改进控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 41-46.
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng. An improved control strategy for VSC-HVDC using VDCCOL[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 41-46.
- [14] GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. Supply of an entirely passive AC network through a double-Infeed HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 24(11): 2835-2841.
- [15] 陈海荣, 徐政. 基于同步坐标变换的 VSC-HVDC 暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 212-216.
CHEN Hairong, XU Zheng. Transient model and controller design for VSC-HVDC based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 212-216.
- [16] 阮思烨, 李国杰, 孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 57-60, 96.
RUAN Siye, LI Guojie, SUN Yuanzhang. A control strategy for multi-infeed VSC-HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 57-60, 96.
- [17] 丁涛, 张承学, 孙元博. 基于本地信号的 VSC-MTDC 输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 44-48.
DING Tao, ZHANG Chengxue, SUN Yuanbo. A control strategy based on local signal measuring for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 44-48.

作者简介:

任敬国(1986-), 男, 山东利津人, 博士研究生, 主要研究方向为电压源换流器型高压直流输电技术的控制与应用(E-mail: jack5759990@163.com);

李可军(1972-), 男, 山东高密人, 教授, 博士, 通讯作者, 研究方向为电能质量、灵活交流输电及其智能控制(E-mail: lkjun@sdu.edu.cn);

牛林(1979-), 男, 山东乳山人, 高级工程师, 博士, 主要从事特高压电磁环境、设备在线监测与检修等方面的工作。

基于概率及结构重要度的电力系统事故链模型与仿真

王 涛¹,王兴武¹,顾雪平¹,贾京华²

(1. 华北电力大学 电气与工程学院,河北 保定 071003;

2. 河北电力调度通信中心,河北 石家庄 050021)

摘要: 通过分析电力系统连锁故障的一般演化规律,在已有的事故链模型基础上,提出一种同时考虑事故概率重要度和设备在网络中的结构重要度的事故链中间环节的预测指标。采用离差最大化的灰色关联度算法综合考虑各类指标,构建电网连锁故障的事故链搜索模型。采用 IEEE-RTS 系统仿真得到风险值较大的事故链集合,仿真结果验证了所提模型的有效性。

关键词: 电力系统; 连锁故障; 大停电; 事故链; 故障分析; 多属性决策; 模型; 仿真

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.009

0 引言

随着全球经济的发展和人们对电力需求的日益增加,现代电力系统的规模越来越大,其复杂程度也不断增加。此时,电网事故所波及的范围更广,后果更为严重^[1-4]。这种大停电事故多由连锁故障发展而成,如 2003 年的北美 8·14 大停电^[5]等。

预先建立连锁故障的分析模型,对连锁故障发展路径进行搜索,分析搜索到的故障序列并给出合理的预防控制措施^[6],这对于有效地预防连锁故障大停电事故具有重大意义。

目前,国内外关于电网连锁故障的研究方法可分为模式搜索法、模型分析法和风险评估法^[7]。模

式搜索法^[8-9]主要通过建立合理的电网模型和算法,对电网的连锁故障过程进行模拟。模型分析法有 2 个分支:一个是基于复杂系统理论的建模研究,有关学者抽象出了自组织临界模型、OPA 模型、CASCADE 模型、隐性故障模型^[10]、分支过程模型等;另外一个基于复杂网络理论的建模研究,具有代表性的模型有小世界网络模型和无标度网络模型。风险评估理论是一种将灾害的可能性和严重度相结合的理论,使运行人员能够检查出设备在使用过程中存在的风险,从而选择合适的安全控制措施。

基于电网事故链^[11-13]模型的连锁故障分析方法是模式搜索法的一种,与普通的模式搜索法相比,采用事故链分析模型可以直观地模拟电网连锁故障的发展路径,一目了然地将最终结果呈现出来,符合电网连锁故障的一般演化过程。本文在事故链模型分析方法基础上,提出了一种新的风险指标作为事故链中间环节的触发指标,不仅考虑了事故发

收稿日期:2012-08-21;修回日期:2013-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077052);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13MS108)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077052) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13MS108)

Advanced active power control strategy based on additional signal for VSC-HVDC transmission system

REN Jingguo¹,LI Kejun¹,NIU Lin²,ZHAO Jianguo^{1,2},YU Dayang¹,REN Jinggang³,LIANG Yongliang¹

(1. School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China;2. State Grid of China Technology College,Ji'nan 250002,China;3. Dongying Power Supply Company,Dongying 257091,China)

Abstract: An advanced active power control strategy based on additional signal is proposed,which guarantees the DC voltage control and achieves active power balance during the big disturbance in VSC-HVDC transmission system. The variation characteristics of DC voltage and active power under fault situations are briefly analyzed,the power characteristic curve of advanced controller is given and the computational formula for the maximal working range of DC voltage at the constant active power control end is derived. The design of outer-loop active power controller is introduced,the computational formula of active power correction is derived and the operating principle of the controller is analyzed for normal and faulty operating conditions of VSC-HVDC system. Simulative study with PSCAD/EMTDC verifies that,the proposed control strategy maintains the DC voltage within the range of safe operation during the transient disturbances of grid voltage sag or leading inversion station breakdown.

Key words: voltage source converter; HVDC power transmission; flexible HVDC; power control; voltage control