

改善多馈入直流系统电压无功特性的直流控制策略

李妮¹, 李兴源¹, 冯明¹, 肖俊¹, 洪潮²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 中国南方电网有限责任公司 电网技术研究中心, 广东 广州 510080)

摘要: 为了改善多馈入直流系统受端交流系统的电压无功综合特性,在直流系统逆变侧引入了定交流电压控制;然后,使用新型指标——电压稳定耦合因子来衡量直流输电系统换流母线间的影响,并指导该控制方式在多馈入系统中的设置方案;同时,提出了一种平滑切换逻辑控制器,以实现直流系统在定交流电压控制和其他控制策略之间的平滑切换。针对三馈入直流输电系统的电磁暂态仿真结果说明,当受端交流系统发生严重故障时,该控制策略相比常规的定熄弧角控制,能够有效改善弱交流系统电压稳定性及直流系统间的不利相互作用。

关键词: 多馈入直流系统; 无功补偿; 定交流电压控制; 电压稳定耦合因子; 直流输电; 稳定性

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.005

0 引言

随着我国直流输电规模的快速增长,单个直流输电容量的增加和多馈入受端结构的形成,电网“强直流弱交流”特点逐渐明显。南方电网作为典型的多馈入受端系统,具有负荷密集、感应电动机比例较高的特点。在这种情况下,受端交流系统发生故障可能导致多回直流同时换相失败,并产生复杂的交直流相互作用,使得系统动态无功需求剧烈变化;同时,由于直流落点处的负荷中心地区缺乏电源支撑,动态无功缺乏,交流系统严重故障时电压稳定问题突出,威胁着系统安全^[1-2]。因此,合适的直流控制技术与动态无功补偿技术对解决受端系统电压稳定问题有着关键的作用^[3-6],利用直流系统本身的无功调节能力相较于装设无功补偿装置而言,是一种更为经济的手段。

目前基于换流站控制改善交流系统无功特性的控制系统大致分为2类:一类以交流系统无功功率交换量为控制对象,将换流器与交流系统交换的无功功率控制在一定的范围内;另一类是以换流母线电压为控制对象,以维持交流电压稳定进行换流站无功调节^[7-10]。针对多馈入系统的无功调节措施,较多采用第二类,文献[9]提出基于交流电压偏差变化的熄弧角无功调节方法,由于该方法受制于熄弧角,无功调节对受端电压稳定作用有限,仅针对过电压的情况。文献[10]设计的协调控制器中提出

定交流电压控制,能够在加快系统恢复的同时有效改善交流母线电压稳定性,但该方法的理论研究及可行性有待进一步研究。

基于上述研究,本文从换流器运行特性的角度,分析了定交流电压控制对无功功率的调制作用,结合多馈入系统结构及电压的评估指标,提出了该控制方式在逆变侧的配合及设置策略,对受端电网换流母线电压稳定问题及动态无功缺乏问题具有一定的改善作用。最后通过算例分析,验证了该控制方案的有效性及其可行性。

1 定交流电压控制特性

定交流电压控制属于直流站控制,其实质是通过调节换流器与交流系统的无功功率交换,控制换流站内交流母线的电压特性^[11]。文献[12]通过仿真研究证明了该控制方法对多馈入系统恢复期间的电压波动和后继换相失败有一定程度的抑制作用。本文从逆变器运行范围的角度对定交流电压特性进行分析。

稳态运行时,逆变器有功和无功功率的运行范围可由 P_n-Q_n 坐标系统表示^[13],如图1所示。以流向直流系统的功率方向为正,定直流电流 I_d 特性是以原点为圆心的圆,需在最大电流 I_{dmax} 与最小电流 I_{dmin} 这2个圆弧之间变化;定直流电压 U_d 特性是通过原点的直线,它与运行功率 P_n 轴的夹角为功率因数角 φ , U_d 可在 $0\sim U_{d0}$ 范围内调节;定熄弧角 γ 特性为一条下凸曲线,变化范围在 $\gamma \geq \gamma_0$ (γ_0 为允许运行的最小熄弧角)内。因此逆变器的运行范围实际是限制在定 γ_0 特性曲线、 I_{dmax} 和 I_{dmin} 圆弧以及 $U_d=0$ 所围成的封闭区域内。图中, e 为逆变器额定运行点; P_{de} 为额定输送功率; φ_0 为额定功率因数角; U_{d0}

收稿日期:2015-03-17;修回日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51037003);南方电网公司科技项目(K-KY2013-001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51037003) and the Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company Limited(K-KY2013-001)

为逆变侧空载直流电压。由图 1 可知,若逆变器不限于定熄弧角运行,在保持额定直流功率不变的情况下,其无功功率可沿线 1 进行调节,由 $I_{d\max}$ 与 γ_0 分别限制最大与最小可调量。该图表明,充分利用逆变器的无功功率调节能力,可以在一定程度上解决换流站内无功功率平衡问题,尤其是与弱交流系统相连的换流站。

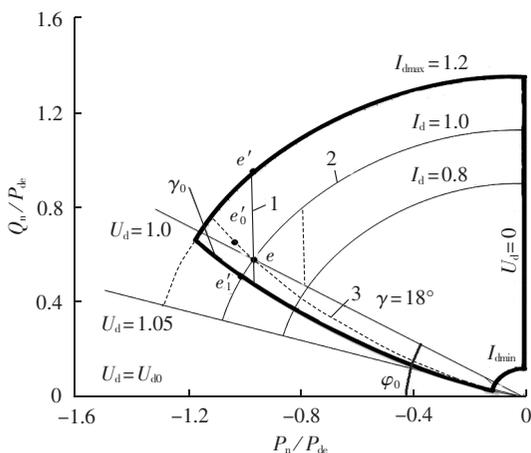


图 1 逆变器运行范围

Fig.1 Operating range of inverter

当逆变器采用定交流电压 U_i 控制时,一般情况下,整流器采用定电流控制,可以维持逆变器的视在功率 S_i 不变,运行特性与定直流电流重叠,如曲线 2,在额定运行点 e 处与定熄弧角特性相交。已知逆变器控制运行与功率因数的关系为:

$$\cos \gamma = \cos \beta + \frac{6I_d X_i}{\pi U_i} \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \frac{\pi U_d}{3\sqrt{2} U_i} = \cos \beta + \frac{\sqrt{2} I_d X_i}{2U_i} \quad (2)$$

当交流系统受到扰动,母线电压 U_i 呈下降趋势。当逆变器采用定熄弧角控制时,如式(1)所示,为了维持 γ 恒定,使控制角 β 增大,功率因数角 φ 增大,即图 1 中运行点沿曲线 3 偏移至点 e'_0 ,逆变器消耗的无功功率 Q_n 增加,导致 U_i 进一步下降;当逆变器采用定交流电压控制时,为了维持 U_i 在整定值内恒定,逆变器快速调节控制角,即使 β 减小, φ 减小,运行点沿 e'_1 方向移动,逆变器消耗的无功 Q_n 减小。

如图 1 所示,在逆变器运行范围内,定交流电压控制与定熄弧角控制的无功功率特性分别为曲线 2 与曲线 3。当系统轻载运行时,定交流电压控制将增大换流器无功功率吸收,维持交流母线电压为整定值;定熄弧角控制则需通过切电容器、静止无功补偿器增发感性无功等来调节过剩的无功功率,调节量由曲线 2 与 3 的纵坐标差决定,当 $P_n=0.8P_{de}$ 时,无功功率调节量约 $0.4P_{de}$ 。由此可见,相比定熄弧角控制,定交流电压控制具有更有利于控制无功

功率、稳定母线电压,在适宜情况下可作为改善弱交流系统电压稳定性的经济控制技术。

2 多馈入系统电压稳定评估计算

2.1 电压稳定耦合因子的定义

落点较近的多馈入直流系统,换流站交流母线的电气联系较强,其间的相互作用可能导致系统总体性能下降^[14]。因此衡量换流母线电压的稳定性,需要同时考虑系统的自身强度以及直流间的耦合影响^[15]。

电压稳定因子(VSF)是衡量电压稳定性的经典判据之一,它代表节点电压对注入无功扰动的灵敏度^[16]。由于其物理意义明确,该指标同样适用于多馈入系统,衡量直流输电中换流母线电压稳定性。

已知简单多馈入模型如图 2 所示,对系统 i 而言, VSF_i 的定义如下:

$$VSF_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta Q_i} \quad (3)$$

其中, VSF_i 为正表示系统静态电压稳定,其值越小越稳定,越大则稳定性越弱。从定义上看,该指标重点考虑了节点自身处的电压稳定,没有突出直流间的相互作用。

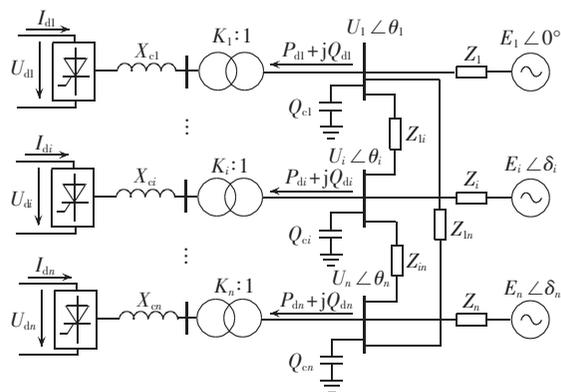


图 2 多馈入直流系统简化模型

Fig.2 Simplified model of multi-infeed HVDC system

利用多馈入交互作用因子(MIIF),能够定量描述两换流母线间电压相互影响的程度^[17],即母线 i 对母线 j 的交互作用因子 $MIIF_{ji}$ 可表示为:

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| \quad (4)$$

其中, $\frac{\Delta U_j}{\Delta U_i}$ 为定义表达式,指在换流母线 i 处投入对称三相电抗器引起 1% 的电压波动 ΔU_i 时,换流母线 j 的电压变化率; $\frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}}$ 为结构表达式,其中 Z_{eqij} 、 Z_{eqii} 分别代表保留换流母线的节点阻抗矩阵 Z_{eq} 中互阻抗与自阻抗元素。不论在定义式还是结构式中,均可看出交互作用因子指标表征了直流 i 对直

流 j 的参与度。

综上分析,假定在母线 i 处投入三相电抗器,产生无功扰动(记为 ΔQ_i), i 的电压波动可记为:

$$\Delta U_i = \Delta Q_i \cdot \text{VSF}_i \quad (5)$$

根据两节点间的交互关系, ΔU_i 使得母线 j 产生的电压变化为:

$$\Delta U_j = \Delta U_i \cdot \text{MIIF}_{ji} = \Delta Q_i \cdot \text{VSF}_i \cdot \text{MIIF}_{ji} \quad (6)$$

同理,由式(6)可定义多馈入系统中,某一换流母线 i 发生无功扰动 $\Delta Q_i (i=1, 2, \dots, n; i \neq j)$ 时,母线 j 的电压稳定因子为:

$$\text{VSF}_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta Q_i} = \text{VSF}_i \cdot \text{MIIF}_{ji} \quad (7)$$

综上,为了衡量某一换流母线电压受到所有与其相连的直流系统无功波动的影响,可定义节点 j 的电压稳定耦合因子(VSIF)为:

$$\text{VSIF}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^n \text{VSF}_i \cdot \text{MIIF}_{ji} \quad (8)$$

对于 n 馈入的直流系统, VSIF_j 的含义为:依次在换流母线 $i (i=1, 2, \dots, n; i \neq j)$ 注入无功功率,而引起 1% 的电压波动时,母线 j 的电压稳定程度之和。

在多馈入交直流系统中,换流母线节点 j 的电压耦合因子 VSIF_j 越大,则说明该母线电压受其他节点无功扰动的影响越大。在动态无功缺乏的情况下,其他节点发生故障可引起该母线电压较大幅度的波动,同时增加了换相失败的风险^[18]。

2.2 电压稳定耦合因子的计算方法

下面将通过解析法对电压稳定耦合因子进行求解分析^[20]。

如图 2 所示的多馈入系统,其线性化潮流形式可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \approx J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, ΔP 、 ΔQ 为母线注入功率的增量; J 为 $2n \times 2n$ 阶的雅可比矩阵。

由于换流站注入节点的直流功率变化量仅与当地电压幅值相关,与交流系统电压相角无关。对式(9)中的直流量进行修正,有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU}' \\ J_{Q\theta} & J_{QU}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\Delta P'$ 、 $\Delta Q'$ 为不包含换流站注入节点的直流功率增量; J_{PU}' 、 J_{QU}' 分别为 J_{PU} 、 J_{QU} 对角线元素的修正矩阵。修正元素为:

$$\begin{cases} J_{PU(G,i)} = J_{PU(G,i)} - \frac{dP_{\dot{u}}}{dU_i} \Big|_{(0)} \\ J_{QU(G,i)} = J_{QU(G,i)} - \frac{dQ_{\dot{u}}}{dU_i} \Big|_{(0)} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

令 $\Delta P=0$ 时,根据文献[19]可知 ΔQ 与 ΔU 的

关系为:

$$\Delta Q \approx (J'_{QU} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J'_{PU}) \Delta U = J_R \Delta U \quad (12)$$

由电压稳定因子的定义式可知:

$$\text{MIIF}_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \approx \frac{J'_{QU,j}}{J'_{QU,i}} \quad (13)$$

根据式(12)、(13)可知,电压稳定耦合因子同样可表示为:

$$\begin{cases} \text{VSIF}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^n J_{R(G,i)}^{-1} \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \\ \text{VSIF}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^n J_{R(j,i)}^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知,电压稳定耦合因子为降阶雅可比矩阵 J_R^{-1} 第 j 行除对角元素的和值,其值决定了换流母线电压交互耦合的强度。可以看出,电压稳定耦合因子与直流系统、受端交流系统的结构参数密切相关。

3 控制策略的实现

3.1 定交流电压控制的配合方式

逆变侧控制是由多个控制器相互配合组成,通常以某一控制器为主要调节,其余控制器作为附加调节。定交流电压控制无论设为主控制或附加控制,都是通过调节 β 角控制逆变器无功消耗来维持换流母线电压稳定。若将定交流电压控制设为主控制器,直流电压将运行在较大的范围,分析如下。

定交流电压控制的稳态运行特性为:

$$U_i = \frac{2\pi R_i I_d}{3\sqrt{2} [\cos(\beta - \mu) - \cos\beta]} \quad (15)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_i \cos\beta + R_i I_d \quad (16)$$

设在直流控制作用下 U_i 与 I_d 保持恒定,认为叠弧角 μ 不变,由式(16)可知直流电压将随 β 变化而波动,已知 $\beta \in (30^\circ, 90^\circ)$,将式(15)代入式(16),求 U_d 对 β 的偏导为:

$$\frac{dU_d}{d\beta} = \frac{A_1}{A_2} \quad (17)$$

$$A_1 = 2R_i I_d [\sin\beta \cos(\beta - \mu) - \cos\beta \sin(\beta - \mu)] \quad (18)$$

$$A_2 = -\cos^2\beta [\cos(\beta - \mu) / \cos\beta - 1]^2 \quad (19)$$

由系统运行状态易知 $A_1 > 0$, $A_2 < 0$; 稳态中 β 维持在较小的角度, U_d 随 β 的上调呈减小趋势。考虑到直流输电工程中,由投切无功装置等引起换流母线无功扰动频繁,易使 U_d 低于额定运行点运行,从而增加有功功率的传输损耗,影响运行的经济性。然而,为了解决传统定熄弧角控制方式在扰动期间使功率因数下降,不利于电压稳定,易导致弱受端系统电压崩溃的问题,定交流电压控制更加适合作为定熄弧角控制的附加控制。其原理框图如图 3 所示。

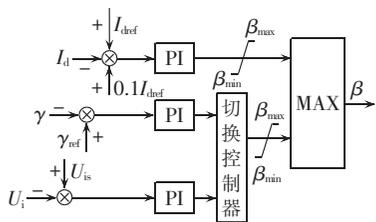


图 3 定交流电压控制原理框图

Fig.3 Schematic diagram of constant AC voltage control

3.2 平滑切换逻辑控制器设计

为了避免噪声干扰和瞬时小扰动引起不必要的控制动作,切换控制器通常需要满足一定的切换条件^[10],实现逆变器控制方式的平滑转换。

由于常规定熄弧角控制与附加定交流电压控制器参数配置的不同,在定交流电压控制接收指令退出控制时,2种控制方式存在微小的控制量(β)差,在系统恢复稳态后,简单的切换动作也可能引起较大的振荡。为了避免对系统的再次干扰,本文设计了基于状态跟随的平滑切换控制方法,其原理如图 4 所示。

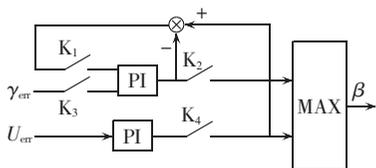


图 4 平滑切换逻辑控制器原理框图

Fig.4 Schematic diagram of smooth logic switchover controller

将定交流电压控制状态与定熄弧角控制状态设计为一负反馈,作为定熄弧角的一个输入,使得暂态过程中定熄弧角随时跟随定交流电压输出,保证切换前 2 个控制器输出的状态量总是一致。同时对逻辑开关 K_1 — K_4 进行合理的控制实现。

(1) 系统稳态时: K_2 、 K_3 闭合, K_1 、 K_4 断开;逆变器运行在定熄弧角控制方式下,隔离定交流电压控制。

(2) 定交流电压控制时: K_1 、 K_3 、 K_4 闭合, K_2 断开;扰动期间,定熄弧角闭环控制器的状态量将跟随定交流电压控制器输出,此时逆变器侧的控制是以换流母线电压为主要调制对象的控制作用。

3.3 控制器参数寻优算法

为了满足逆变器侧定交流电压附加控制器的性能要求,本文采用非线性规划 SIMPLEX 算法对附加控制器参数 K_p 、 K_i 进行优化。

非线性规划数学模型的一般形式为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) \\ g_j(\mathbf{X}) \geq 0 \quad j=1,2,\dots,l \end{cases} \quad (20)$$

设 \mathbf{R} 是满足上式约束条件 $g_j(\mathbf{X})$ 的 n 维欧氏空

间 \mathbf{E}^n 中的一个开集,则多元函数 $f(\mathbf{X})$ 最小极点存在的必要条件为: $f(\mathbf{X})$ 在 \mathbf{R} 上有二阶连续偏导数,对于 $\mathbf{X}^* \in \mathbf{R}$,若 $\nabla f(\mathbf{X}^*)=0$ 且二阶偏导数矩阵(Hessian 矩阵) $\nabla^2 f(\mathbf{X}^*)$ 正定,则 $\mathbf{X}^* \in \mathbf{R}$ 为 $f(\mathbf{X})$ 的严格局部极小点。

在规划式(20)的求解过程中,搜索方向的确定及迭代步长的选择是优化算法的关键,由于 SIMPLEX 算法对初值敏感且易陷入局部最优,本文参数优化迭代过程分为初值搜索迭代和优化迭代:首先以较大步长和较小数值仿真次数得到 SIMPLEX 迭代初值,然后利用 SIMPLEX 算法在较小的步长范围内得到最优解。本文在 PSCAD 程序中,分别由 Multirun 模块与 Simplex 模块来实现上述步骤。

设目标函数满足换流母线实际电压 U_i 与整定值 U_{ref} 的偏差最小,为:

$$J = \int_0^T (U_i - U_{ref})^2 dt \quad (21)$$

寻优控制器参数 K_p 、 K_i 的步骤如下。

a. 给定初值 $\mathbf{X}_0 = [K_{p0} \ K_{i0}]$ 及可行域 \mathbf{R} 。

b. 确定搜索方向 \mathbf{D}_k 与步长 λ_k ,使迭代满足:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k + \lambda_k \mathbf{D}_k \in \mathbf{R} \\ f(\mathbf{X}_{k+1}) < f(\mathbf{X}_k) \end{cases} \quad (22)$$

c. 初步求得可行域最优解,得到 SIMPLEX 算法初值 $\mathbf{X}^{(0)}$ 。

d. 设定优化次数 N ,利用 SIMPLEX 求解目标函数。

e. 迭代结束,得到最优解 K_p 、 K_i 。

4 控制策略的仿真研究

4.1 系统模型

为了验证本文提出的直流控制策略效果,基于 CIGRE 直流输电标准测试模型搭建了三馈入直流系统,结构如图 2 所示。每条直流线路的系统参数及无功补偿参数与 CIGRE 标准系统参数相同。通过改变等值阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 或联络线距离可以得到不同交流系统强度和电压稳定交互因子的多馈入系统。设 $Z_1=4.996+j14.5852 \ \Omega$ 、 $Z_2=4.75+j13.414 \ \Omega$ 、 $Z_3=5.7906+j20.457 \ \Omega$,各直流系统逆变器侧的电气距离为 $l_{12}=50 \text{ km}$ 、 $l_{13}=80 \text{ km}$ 、 $l_{23}=30 \text{ km}$,得到系统电压评估指标如表 1 所示。联络线阻抗为 $0.41 \ \Omega/\text{km}$, $X/R=6$ 。

表 1 系统电压评估指标

Table 1 Evaluation indexes of system voltage

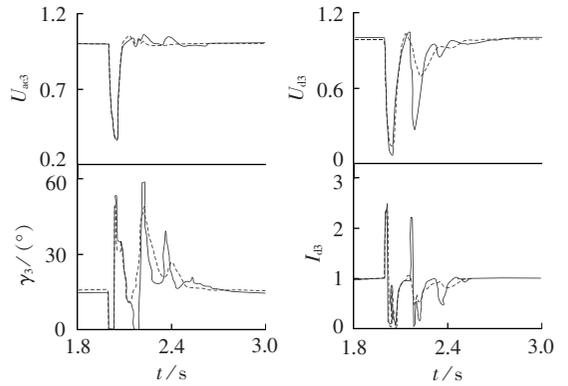
直流系统	MESCR _i	VSF _i	VSIF _i
DC1	3.052	0.230	0.0904
DC2	3.271	0.188	0.1277
DC3	2.334	0.683	0.0666

由表 1 可以看出,多馈入有效短路比(MESCR)与电压稳定因子对换流母线电压稳定特性的评估结果一致,由弱到强依次为:DC3、DC1、DC2。根据电压稳定耦合因子的大小,各母线电压受耦合影响,由大到小依次为:DC2、DC1、DC3。上述指标表明,DC3 换流母线的电压稳定性最弱;DC2 母线电压受到的耦合作用最大,由于与 DC2 相连的 DC1、DC3 系统强度相对较弱,其受联络线无功波动产生的不利影响也将最大。因此从改善系统整定电压稳定性角度出发,对 DC3、DC2 逆变站装设定交流电压附加控制。

4.2 仿真结果

为了验证上述控制方案的效果,考察最弱系统 DC3 逆变侧换流母线处发生三相短路故障,故障持续时间 0.05 s,DC3、DC2 系统加入定交流电压附加控制时,各直流系统的电压恢复特性如图 5 所示(交流母线电压 U_{ac} 、直流电压 U_d 、直流电流 I_d 均为标幺值)。

由图 5 可见,在常规定熄弧角控制作用下,弱交流系统发生的严重故障对多条直流系统的电压稳定性产生了不利影响;随着 DC3 换流母线电压骤降至 0.4 p.u.,DC1、DC2 系统交流母线电压被迅速下拉至 0.85 p.u.,直流电压分别跌落至 0.72 p.u. 与 0.26 p.u.,3 条直流逆变侧同时发生换相失败;故障清除后,由于常规定熄弧角控制的超调作用,换流



(c) DC3 系统

—— 常规定熄弧角控制
 - - - - 加入定交流电压附加控制

图 5 定交流电压控制对换流母线电压特性的影响

Fig.5 Influence of constant AC voltage control on voltage characteristics of commutation bus

站功率因数暂时大幅减小,造成逆变侧无功功率的剧烈交换,各母线电压波动严重,尤其是电压稳定耦合因子最大的 DC2 系统与弱系统 DC3 都出现了后继换相失败。

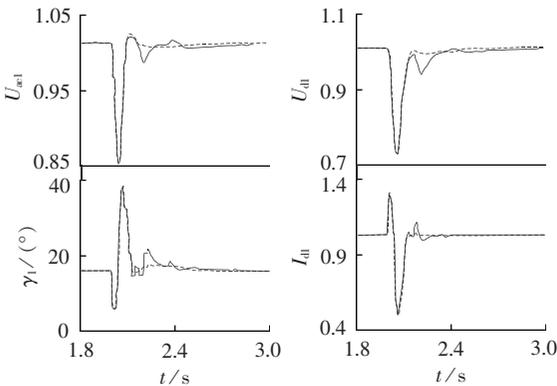
加入定交流电压附加控制后,故障期间,DC3 系统逆变器通过调节功率因数,以阻止电压的深度跌落;故障清除后,换相电压恢复过程较平稳,电压波动较小,无后继换相失败,如图 5(c)所示。DC2 系统在加入附加控制后,扰动期间以母线电压为主要调节目标;随着系统恢复期间动态无功平衡问题得以解决,避免了由于强耦合作用引起的电压波动及后继换相失败,如图 5(b)所示。同时 DC1 系统电压、电流暂态特性及熄弧角变化如图 5(a)所示,在系统间的相互作用下,DC2、DC3 系统换流母线电压稳定性提高对其也有一定的支撑作用,电压波动因此减小。综上所述可以看出,本控制方案能够改善联系较为紧密的多馈入系统电压稳定性,提高系统整体恢复速度。

5 结论

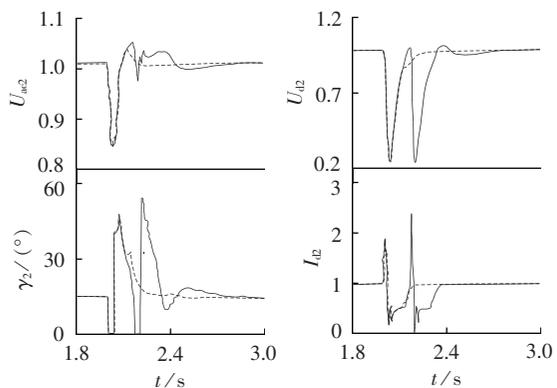
a. 定交流电压附加控制配合定熄弧角控制,能够有效抑制定熄弧角控制的超调量带来的不利影响,提高电压扰动期间的稳定性,同时保证直流输电的经济运行。

b. 电压稳定耦合因子指标能够表征某一直流换流母线电压受其余换流母线的影响的程度。以该指标来指导控制策略的布置方案能够反映出在哪些直流输电系统中采用定交流电压控制取得的控制效果更好。

c. 设计的平滑切换逻辑控制器,有效地减小了由于控制参数不同引起的切换振荡,保证系统工况改变时直流控制方式的顺利转换。



(a) DC1 系统



(b) DC2 系统

d. 稳态降功率运行时,定最小熄弧角控制运行最经济,但是无功调节作用很小;定交流电压控制可调节的无功功率范围较大,能一定程度地减少无功设备容量。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010:120-122.
- [2] 汪娟娟,张尧,夏成军,等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术,2008,32(12):30-34.
WANG Juanjuan,ZHANG Yao,XIA Chengjun,et al. Survey of studies on transient voltage stability of AC/DC power system[J]. Power System Technology,2008,32(12):30-34.
- [3] 刘晓明,慈文斌,刘玉田. 直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):69-77.
LIU Xiaoming,CI Wenbin,LIU Yutian. Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):69-77.
- [4] 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 system[J]. Power System Technology,2005,29(5):20-24.
- [5] 陈修宇,韩民晓,刘崇茹. 直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):58-63.
CHEN Xiuyu,HAN Minxiao,LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):58-63.
- [6] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后继换失败措施研究[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.
- [7] 郑超,汤涌,马世英,等. 直流参与稳定控制的典型场景及技术需求[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3750-3759.
ZHENG Chao,TANG Yong,MA Shiyong,et al. A survey on typical scenarios and technology needs for HVDC participated into stability control[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3750-3759.
- [8] 殷威扬,文俊,刘洪涛,等. 葛—南直流输电工程无功及电压控制研究[J]. 高电压技术,2006,32(9):62-66.
YIN Weiyang,WEN Jun,LIU Hongtao,et al. Research on the control of reactive power & AC voltage in Ge-Nan HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering,2006,32(9):62-66.
- [9] 郭小江,马世英,卜广全,等. 上海多馈入直流系统的无功控制策略[J]. 电网技术,2009,33(7):30-35.
GUO Xiaojiang,MA Shiyong,BU Guangquan,et al. Reactive power control strategy for Shanghai multi-infeed DC system[J]. Power System Technology,2009,33(7):30-35.
- [10] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入直流输电的协调恢复策略[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.
- [11] HAMMAD A,SADEK K,KOELSH H,et al. Advanced scheme for AC voltage control at HVDC converter terminal[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1985,PAS-104(4):697-703.
- [12] 杨卫东,薛禹胜,荆勇,等. 南方电网中多个直流系统间的协调功率恢复策略[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):67-70.
YANG Weidong,XUE Yusheng,JING Yong,et al. A coordinated recovery strategy for 3 HVDC systems involved[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(15):67-70.
- [13] 浙江大学直流输电电科研组. 直流输电[M]. 北京:水利水电出版社,1982:139-150.
- [14] 蔡泽祥,朱浩俊,白雪峰,等. 多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J]. 华北电力大学学报,2004,31(5):1-8.
CAI Zexiang,ZHU Haojun,BAI Xuefeng,et al. Dynamic characteristics, stability control and analysis of multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Journal of North China Electric Power University,2004,31(5):1-8.
- [15] 欧开健,荆勇,任震. 多馈入直流输电系统换流母线电压稳定性评估模型和算法[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):23-26.
OU Kaijian,JING Yong,REN Zhen. Model and algorithm for assessing voltage stability at commutation buses in MIDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):23-26.
- [16] HAMMAD A,KUHN W. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1986,1(1):209-215.
- [17] 金小明,周保荣,管霖,等. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化,2009,33(15):98-102.
JIN Xiaoming,ZHOU Baorong,GUAN Lin,et al. HVDC-interaction-strength index for the multi-infeed-HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(15):98-102.
- [18] 袁阳,卫志农,雷霄. 多馈入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. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):140-147.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994:667-670.
- [20] 李佳,刘天琪,陈亮,等. 基于理想点法的多准则综合灵敏度电压稳定评估指标[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):108-112.
LI Jia,LIU Tianqi,CHEN Liang,et al. Multi-criterion integrated-sensitivity voltage stability evaluation index based on ideal point method[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):108-112.

作者简介:



李妮

李妮(1991—),女,四川广安人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电(E-mail:scu_lini@yeah.net);

李兴源(1945—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

DC control for improving voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system

LI Ni¹, LI Xingyuan¹, FENG Ming¹, XIAO Jun¹, HONG Chao²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The constant AC voltage control is applied to the inverter-side of multi-infeed HVDC system to improve the voltage and reactive power characteristics of its receiving-end AC system, and an index called the voltage stability interaction factor is proposed to measure the interaction among the commutation buses of its DC subsystem and to guide the configuration of control strategy in the multi-infeed HVDC system. A controller is designed to realize the smooth switchover between constant AC voltage control and other control strategy. The results of electromagnetic transient simulation for a three-infeed HVDC system show that, when serious fault occurs in the receiving-end AC system, the proposed constant AC voltage control may improve the voltage stability of weak AC system and reduce the adverse interaction between AC and DC systems more effectively than the constant extinction angle control.

Key words: multi-infeed HVDC system; reactive power compensation; constant AC voltage control; voltage stability interaction factor; HVDC power transmission; stability

《电力自动化设备》关于“智能配电系统”专题征文的通知

尊敬的各位专家、科研工作者:

大量分布式能源的接入将改变传统配电系统格局。作为智能电网的关键环节,新型智能配电系统已成为国内外研究的热点,并将是未来发展的趋势和方向。《电力自动化设备》杂志社拟特别推出一期“智能配电系统”专题,并邀请天津大学王守相教授担任专题特约主编,组织智能配电系统各方向领域的优秀稿件,集中展现智能配电系统及相关技术的最新研究进展。

现诚邀高等院校、科研院所及相关企业的专家、学者踊跃投稿。

一 征文内容

征文涵盖智能配电系统相关技术领域,包括但不限于以下方向:

- (1)智能配电系统态势感知技术;
- (2)智能配电系统优化规划技术;
- (3)智能配电系统分布式能源、电动汽车和负荷接纳能力评估与提高技术;
- (4)智能配电系统风险评估与安全预警技术;
- (5)智能配电系统新型保护理论与技术;
- (6)智能配电系统智能控制技术;
- (7)智能配电系统的大数据与云平台技术;
- (8)智能配电系统与用户互动技术。

二 重要截止日期

2016年3月15日全文提交截止。

三 论文要求

(1)内容要求:所投稿件须是未公开发表的原创学术论文,具有较强的理论性、前瞻性和技术性,对实际应用有较好的参考价值;研究数据、过程、结果真实准确;无政治错误,无政治、军事和科学技术泄密情况。

(2)排版要求:论文格式按照《电力自动化设备》杂志论文模板编排(模板可在电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 下载),全文以不超过7页为宜。

(3)署名及作者信息要求:须确认全体作者的署名及排序无争议;文末请附加注明作者姓名、工作单位、职称、学位、研究方向、电子邮箱、手机号码等信息。

(4)投稿要求:请登录电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 进行作者注册后在线投稿,投稿栏目请务必选择“智能配电系统专题”;或直接向专题特约主编王守相教授投稿(邮箱: sxwang@tju.edu.cn)。

四 论文发表

本次征文所有来稿将经过严格的评审流程,并在2016年5月1日前确定是否录用。所录用稿件中的优秀论文将入选《电力自动化设备》2016年“智能配电系统”专辑;若因刊期版面有限而未能入选该专辑,编辑部亦会尽快安排见刊。

五 联系方式

投稿网址: www.epae.cn

编辑部电话:025-83537347;025-51859279

邮箱: epae@sac-china.com (仅供联络,投稿仍通过官网在线注册投稿)