

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191203

提升交流系统暂态稳定性的多端直流最优紧急功率控制

章德¹, 田国梁², 谭玉东¹, 蒋星¹, 朱思睿¹, 丛凡超²

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着新能源在电力系统中的占比日益增大、系统有效惯量不断降低, 交直流系统的暂态稳定性问题变得尤为突出。为解决交直流混联系统有效惯量降低、有效阻尼下降导致的功角稳定性问题, 提出一种基于最优控制的多端直流(MTDC)系统的紧急功率调制方案。通过对直流潮流方程在电压平衡点处线性化, 建立了含有直流网络功率调制控制的交直流混联系统模型。以发电机转子转速偏差和控制能耗最小为目标, 考虑直流母线电压、直流电流、换流器功率等运行约束, 得出最优控制律。基于三机九节点的交直流混联系统非线性数值仿真, 表明所提控制方案在系统故障和负荷突变情况下均可有效抑制多机系统的第一摇摆, 提高交直流系统的暂态稳定性。

关键词: 多端直流网络; 转子功角稳定; 优化控制; 电压源型换流器; 暂态稳定性

Optimal control of MTDC for improving rotor angle stability of AC systems

ZHANG De¹, TIAN Guoliang², TAN Yudong¹, JIANG Xing¹, ZHU Sirui¹, CONG Fanchao²

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Transient stability of a meshed AC/DC system when there is decreased effective inertia with high penetration of renewables has become a major challenge. This paper proposes an emergency power modulation scheme of optimal based control of an MTDC grid for improving the rotor angle stability of a power system after considering the reduction of effective inertia and effective damping. First, an AC/DC meshed system model with power modulation control of a DC grid is established by the linearization of power flow equations of the DC grid. Then, the optimal based control rule of an MTDC grid is deduced by the online minimization of the rotor speed deviations of generators and the control energy, when the limits of DC voltage, the DC line current, and the power of converters are satisfied. Finally, the nonlinear numerical simulations of one simple three-generator nine-bus AC/DC meshed system demonstrate the effectiveness of the proposed scheme in three-phase fault and sudden load changes in AC system. The result shows that the proposed scheme stands out for being better able to suppress the first swing damping oscillation performance of a multi-machine system and improving the transient stability of the AC and DC system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5216A018000H).

Key words: multi-terminal DC grid (MTDC); rotor angle stability; optimal based control; voltage source converter (VSC); transient stability

0 引言

近年来, 基于电压源型换流器(VSC)的多端直流(MTDC)系统广泛应用于区域间电力系统互联、大规模海上风电送出、无源网络供电等场景, 已成为一种颇具前景的输电方式^[1-8]。由于 MTDC 系统能够有效地解耦与之相连的交流系统, 因此阻隔了

互联交流系统间故障的传播^[9-10]。然而, 此特性可能会丧失交直流混联系统故障后区域电网间相互救济的能力。因此, 为实现未来交直流混联系统的可靠运行, 一个重要挑战在于如何提高交直流混联系统的暂态稳定性^[11-12]。

当前, 在改善交直流混联系统的暂态稳定性方面前人已经做了大量的探索工作^[13-27]。其核心思路是根据广域测量系统(WAMS)的信息, 对换流器的有功出力进行快速调制, 以抑制系统故障后功率振

荡,提升系统阻尼。在传统直流输电(LCC-HVDC)中,通过改变整流侧定电流控制中的电流参考值来快速调节受端换流器的暂态有功出力,以此抑制暂态过程中功率摇摆^[13-15]。此外,基于LCC的HVDC具有在1.5倍额定电流下过载2~3s的能力,因此,可以快速提升故障下输送到受端系统的功率,填补暂态功率缺额,从而有效提高电力系统的暂态稳定性。然而,已有的工作主要关注基于LCC的双端HVDC系统,或并联HVDC系统。基于VSC的MTDC系统的有功功率快速调制以提升交直流混流系统暂态稳定性却鲜有涉及。

文献[16-17]分析了四端VSC-MTDC系统可通过有功功率调制来抑制区域间振荡阻尼。研究表明,在系统经受干扰期间,快速调节换流器的有功输出可以改善交直流混流系统的暂态稳定性。文献[18]提出基于李雅普诺夫函数法的最优时间控制,通过调节MTDC网络的功率注入,来提高电力系统的转子功角稳定性。文献[19]提出基于反馈线性化的非线性控制抑制多机系统中的第一周期摆动来提升交直流混流系统的暂态稳定性。然而,这些控制方案均需要大量广域测量信息和复杂计算,并不适合在线应用。文献[20]仅使用换流器连接的交流侧局部频率测量量和惯性中心(COI)的速度来增强转子功角稳定性。在文献[21]中还发现,使用局部扰动信号对换流器进行无功功率调制也可以改善交直流混流系统的暂态稳定性。为了提升系统鲁棒性并降低外部噪声和WAMS延迟的影响,文献[22]提出了基于VSC的MTDC系统的滑模控制。文献[23]中进一步提出了基于能量函数的风电场与MTDC系统协同控制策略,以提高交流系统的暂态稳定性。文献[24]利用运动轨迹灵敏度来评估交直流系统的暂态稳定裕度,并给出了其稳定性指标。文献[25]研究了考虑暂态稳定性约束的换流器下垂参数设计,以尽可能改善N-1故障下系统的暂态稳定性。文献[26]提出一种分散辅助控制策略,利用直流电容为系统提供惯性支持。

上述文献中的MTDC系统均被视作几个独立的功率注入源,没有考虑各换流器控制间的耦合作用。此外,大量研究主要集中在通过给定控制结构下调整各换流器的功率注入,为多机系统提供暂态稳定支撑,而没有考虑各换流器之间的协调控制,因此无法给出多端直流系统提高暂态稳定性的最优控制方案。

本文提出了一种基于VSC的MTDC系统的新型最优控制方法,以提升交直流混流系统的暂态稳定性。通过在直流电压参考值处对MTDC系统的功

率方程线性化,建立每个换流器的有功出力和功率参考值的传递矩阵。在此基础上,建立基于MTDC有功功率调制控制的交直流混联系统模型。此外,以发电机转子转速偏差和控制结构能耗最小为目标,考虑直流母线电压、直流电流、换流器功率等运行约束的限制,得出最优控制律。与传统基于反馈的控制方法相比,本文所提的方法可以在系统受扰后更好地抑制多机系统的第一周期摇摆。

1 MTDC系统数学模型

MTDC系统包含多个换流器,这些换流器通过直流输电线路以网状或辐射状的形式相互连接起来。将直流电压维持在正常范围内对于维持MTDC系统的稳定运行至关重要。传统的主从控制是主换流器控制直流母线电压,从换流器控制与系统交换的有功功率。因此主换流器要承担由此产生的全部不平衡功率。此外,一旦主换流器(维持直流电压恒定的换流器)发生故障,MTDC系统可能会发生崩溃,从而退出运行。因此,对于现行的交直流混联系统,采用如图1所示的电压下垂控制是一种较佳选择。

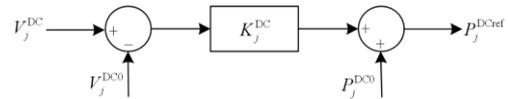


图1 单VSC的功率-电压下垂控制

Fig. 1 Power-voltage droop control for single VSC

文献[28]中给出了基于MMC型换流器的电压下垂控制的基本控制框图以及基于此策略下,保证直流电网稳定运行的下垂系数的运行范围。直流电压下垂控制是MTDC系统的经典控制策略,大量研究多端直流的文献均基于此控制策略。因为在该控制策略下,所有换流器均可维持直流电压稳定,并实现自动功率分配。但是在此策略下,用于稳定分析的多端直流系统的数学模型并未较好地建立。本文在基于直流电压下垂控制策略下,建立了多端直流电网的线性潮流模型。由于VSC的快速功率调节特性,换流器j的有功功率参考值 P_j^{DCref} 可认为与换流器j的注入有功功率 P_j^{DC} 相同。因此,基于如图1所示的电压下垂控制方案,每个换流器j的有功出力可由式(1)表示。

$$P_j^{\text{DCref}} = P_j^{\text{DC}} = P_j^{\text{DC0}} + K_j^{\text{DC}} (V_j^{\text{DC}} - V_j^{\text{DC0}}) \quad (1)$$

式中: V_j^{DC} 为第j个换流器的直流电压; P_j^{DC0} 为第j个换流器的功率设定值; K_j^{DC} 和 V_j^{DC0} 分别为第j个换流器的直流电压下垂系数和初始直流电压设定

值。通常, $V_j^{\text{DC}0}$ 设定为额定直流电压(1 p.u.)。在本文中, 选择注入换流器的电流方向作为正方向, 因此各直流端的功率方程可表示为

$$P_j^{\text{DC}} = \sum_{i=1}^{N_D} (V_j^{\text{DC}} - V_i^{\text{DC}}) \cdot Y_{ji} \cdot V_j^{\text{DC}} \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为直流线路 ij 间的导纳; V_i 、 V_j 为换流器 i 、 j 处的电压。考虑到在交直流混联系统正常运行下直流电压变化相对较小, 方程式(2)可以在 1.0 p.u. 的附近线性化。

$$P_j^{\text{DC}} = P_j^{\text{DC}} \Big|_{V_i^{\text{DC}}=1} + \frac{\partial P_j^{\text{DC}}}{\partial V_j^{\text{DC}}} \Big|_{V_i^{\text{DC}}=1} \cdot (V_j^{\text{DC}} - V_j^{\text{DC}0}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} \frac{\partial P_j^{\text{DC}}}{\partial V_i^{\text{DC}}} \Big|_{V_i^{\text{DC}}=1} \cdot (V_i^{\text{DC}} - V_i^{\text{DC}0}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} Y_{ji} \cdot (V_j^{\text{DC}} - V_j^{\text{DC}0}) - Y_{ji} \cdot (V_i^{\text{DC}} - V_i^{\text{DC}0}) \quad (3)$$

结合式(1)和式(3), 得

$$P_j^{\text{DC}0} = \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} Y_{ji} - K_j^{\text{DC}} \right) \cdot (V_j^{\text{DC}} - V_j^{\text{DC}0}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} Y_{ji} \cdot (V_i^{\text{DC}} - V_i^{\text{DC}0}) - V_i^{\text{DC}0} = (Y_{ji} - K_j^{\text{DC}}) \cdot (V_j^{\text{DC}} - V_j^{\text{DC}0}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} Y_{ji} \cdot (V_i^{\text{DC}} - V_i^{\text{DC}0}) \quad (4)$$

直流系统导纳矩阵 Y_{DC} 定义为

$$Y_{\text{DC}} = \begin{cases} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N_D} Y_{ji} - K_j^{\text{DC}} = Y_{ji} - K_j^{\text{DC}} & (i = j) \\ -Y_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \quad (5)$$

为方便推导, 定义相关矩阵如下: $\mathbf{P}_{\text{DC}0}$ 表示 $N_{\text{DC}} \times 1$ 换流器功率设定值矢量, \mathbf{V}_{DC} 表示 $N_{\text{DC}} \times 1$ 换流器的直流电压矢量, $\mathbf{V}_{\text{DC}0}$ 表示 $N_{\text{DC}} \times 1$ 直流初始电压设定值矢量。对于换流器, 等式可以写成如下矩阵形式

$$\mathbf{P}_{\text{DC}0} = \mathbf{Y}_{\text{DC}} \cdot (\mathbf{V}_{\text{DC}} - \mathbf{V}_{\text{DC}0}) \quad (6)$$

结合式(1)和式(6), 得

$$\mathbf{P}_{\text{DC}} = \mathbf{P}_{\text{DC}0} + \text{diag}(K_j^{\text{DC}}) \cdot \text{Inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \cdot \mathbf{P}_{\text{DC}0} = \begin{bmatrix} I_{44} + \text{diag}(K_j^{\text{DC}}) \cdot \text{Inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \\ I_{44} + \text{diag}(K_j^{\text{DC}}) \cdot \text{Inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \\ I_{44} + \text{diag}(K_j^{\text{DC}}) \cdot \text{Inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \\ I_{44} + \text{diag}(K_j^{\text{DC}}) \cdot \text{Inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_{\text{DC}0} \quad (7)$$

方程(7)表明了并网换流器下垂系数、功率参考值和端口输出功率三者间的数学关系。当每个并网换流器的下垂系数和功率参考值固定时, 分配给每个变换器的功率是固定的。因此, 系统受扰后, 可通过调节直流下垂系数或直流功率参考值来改变注

入到每个换流器的直流功率, 进而提升系统暂态稳定性。

2 交直流混联系统模型

为研究交直流混联电力系统的功角稳定性, 首先需要给出交流系统的数学模型^[29], 然后推导出交直流混联系统的数学模型。前人在提升交直流暂态稳定的控制器设计均未较好地考察交流系统的网络方程及直流电网的动态过程。因此, 本文重点考虑发电机转子运动方程, 交流网络方程, 及交直流接口方程, 给出了交直流混流系统的数学表达形式。基于此模型, 可较好地揭示 MTDC 快速有功功率调制得以提升系统暂态稳定性的机理, 并设计最优控制器。

在研究电力系统的功角稳定性时, 一般采用发电机的经典模型(恒定 E'_q 模型), 该模型由下面的二阶微分方程描述:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_j}{dt} = 2\pi f \cdot (\omega_j - \omega_s) \\ \frac{d\omega_j}{dt} = \frac{1}{2H} \cdot (P_{mj} - P_{ej} - D_j \cdot (\omega_j - \omega_s)) \end{cases} \quad j \in G \quad (8)$$

式中: ω_j 和 δ_j 分别为发电机 j 的转子角速度和转子角度; f 和 ω_s 分别为系统的基值频率和角速度; P_{ej} 为发电机 j 的电磁功率; H 为发电机的惯性时间常数; D_j 为发电机 j 的阻尼系数; 发电机机械功率 P_{mj} 在整个暂态过程中保持恒定。负荷模型采用恒阻抗模型。

网络方程可以基于基尔霍夫电流定律(KCL)以矩阵的形式表示为

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{N_b \times N_b} \cdot \mathbf{E} \quad (9)$$

式中: \mathbf{I} 和 \mathbf{E} 分别是交流节点的注入电流矩阵和电压矩阵; $\mathbf{Y}_{N_b \times N_b}$ 为系统的导纳矩阵; N_b 为交流系统的节点数。为了便于后续推导, 交流节点按发电机节点, 交直流连接节点和负荷节点的顺序编写。因此, 式(9)可以写成

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_D \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{N_G \times N_G} & \mathbf{B}_{N_G \times N_D} & \mathbf{C}_{N_G \times N_L} \\ \mathbf{D}_{N_D \times N_G} & \mathbf{E}_{N_D \times N_D} & \mathbf{F}_{N_D \times N_L} \\ \mathbf{G}_{N_L \times N_G} & \mathbf{H}_{N_L \times N_D} & \mathbf{I}_{N_L \times N_L} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{E}_D \\ \mathbf{E}_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, 矩阵 $\mathbf{A} \sim \mathbf{I}$ 是导纳矩阵 \mathbf{Y} 的分块矩阵; 矩阵 \mathbf{E}_G 、 \mathbf{E}_D 和 \mathbf{E}_L 分别是发电机、VSC 和负荷的电压向量; N_G 、 N_D 和 N_L 分别表示发电机、VSC 和负荷的数量。由于负荷的总注入电流等于零, 即 $\mathbf{I}_L=0$, 所以式(10)的最后一个等式可以写成式(11)。

$$\mathbf{E}_L = -\mathbf{I}^{-1} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{E}_G - \mathbf{I}^{-1} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{E}_D \quad (11)$$

结合式(10)和式(11), 消除(10)的最后一行, 新的交流网络方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{C}\mathbf{I}^{-1}\mathbf{G} & \mathbf{B} - \mathbf{C}\mathbf{I}^{-1}\mathbf{H} \\ \mathbf{D} - \mathbf{F}\mathbf{I}^{-1}\mathbf{G} & \mathbf{E} - \mathbf{F}\mathbf{I}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{E}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_n & \mathbf{B}_n \\ \mathbf{C}_n & \mathbf{D}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{E}_D \end{bmatrix} \quad (12)$$

发电机和换流器的有功功率可由式(13)表示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_G \\ \mathbf{P}_{DC} \end{bmatrix} = \text{Re} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{E}_D \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{A}_n & \mathbf{B}_n \\ \mathbf{C}_n & \mathbf{D}_n \end{bmatrix}^* \times \begin{bmatrix} \mathbf{E}_G \\ \mathbf{E}_D \end{bmatrix}^* \right) \quad (13)$$

式中: \otimes 表示矩阵元素相乘的符号; $\text{Re}()$ 表示()的实部, 而() * 表示复数()的共轭; \mathbf{P}_G 和 \mathbf{P}_{DC} 分别是发电机和 VSC 有功功率的 $N_G \times 1$ 和 $N_D \times 1$ 维矩阵。将式(7)代入式(13)得出 VSC 有功功率方程。

$$\mathbf{Y}_{MTDC} \times \mathbf{P}_{DC0} = \mathbf{E}_D \otimes (\mathbf{C}_n^* \times \mathbf{E}_G^*) + \mathbf{E}_D \otimes (\mathbf{D}_n^* \times \mathbf{E}_D^*) \quad (14)$$

从式(14)可得出结论, 在暂态过程中, 快速调节每个换流器功率设定点将改变 VSC 注入到交流系统的有功出力, 这将改变直流节点的电压。应注意, 暂态过程中发电机的电动势 \mathbf{E}_G 保持恒定。因此, 通过求解式(13)中的非线性方程可以获得直流节点的电压 \mathbf{E}_D 。具体求解过程如下。

定义逆运算符“ $-$ ”, 表示运算符上下两行向量元素分别对应相除, 因此直流注入电流 \mathbf{I}_D 可表示为

$$\mathbf{I}_D = \left(\frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D} \right)^* \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)中得

$$\mathbf{C}_n \cdot \mathbf{E}_G + \mathbf{D}_n \cdot \mathbf{E}_D = \left(\frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D} \right)^* \quad (16)$$

将式(16)在 $\mathbf{E}_D = \mathbf{E}_{D0}$ 处线性化, 其中 \mathbf{E}_{D0} 为 VSC 电压初始值, 整理可得

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{E}_G + \mathbf{D}_n \cdot \mathbf{E}_D \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} - \left(\frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D} \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} \right)^* = \\ -\mathbf{D}_n \cdot \Delta \mathbf{E}_D - \left(\frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D \times \mathbf{E}_D} \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} \times \Delta \mathbf{E}_D \right)^* \end{aligned} \quad (17)$$

为方便表示, 将式(17)中部分变量定义为

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{pd0} = \mathbf{C}_n \cdot \mathbf{E}_G + \mathbf{D}_n \cdot \mathbf{E}_D \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} - \left(\frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D} \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} \right)^* \\ \mathbf{F}_n = \frac{\mathbf{P}_{DC}}{\mathbf{E}_D \times \mathbf{E}_D} \Big|_{\mathbf{E}_{D0}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: \mathbf{D}_{pd0} 和 \mathbf{F}_n 为常数矩阵。则式(17)被简化为

$$\mathbf{D}_{pd0} = -\mathbf{D}_n \cdot \Delta \mathbf{E}_D - (\mathbf{F}_n \cdot \Delta \mathbf{E}_D)^* \quad (19)$$

等式右侧因为含有共轭符, 变量难以提取, 等式难以求解。在这里将各个变量分解为实部与虚部, 消除共轭运算的影响, 则式(19)变为

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{pd0} = -[\text{Re}(\mathbf{D}_n) + \text{jIm}(\mathbf{D}_n)] \cdot [\text{Re}(\Delta \mathbf{E}_D) + \text{jIm}(\Delta \mathbf{E}_D)] - \\ [\text{Re}(\mathbf{E}_n^*) + \text{jIm}(\mathbf{E}_n^*)] \cdot [\text{Re}(\Delta \mathbf{E}_D) - \text{jIm}(\Delta \mathbf{E}_D)] \end{aligned} \quad (20)$$

将等式两侧所有变量虚部实部分离并整理为矩阵形式, 如式(21)所示。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \text{Re}(\mathbf{D}_{pd0}) \\ \text{Im}(\mathbf{D}_{pd0}) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \text{Re}(\mathbf{D}_n) + \text{Re}(\mathbf{E}_n^*) & -\text{Im}(\mathbf{D}_n) + \text{Im}(\mathbf{E}_n^*) \\ \text{Im}(\mathbf{D}_n) + \text{Im}(\mathbf{E}_n^*) & \text{Re}(\mathbf{D}_n) - \text{Re}(\mathbf{E}_n^*) \end{pmatrix} \cdot \\ \begin{pmatrix} \text{Re}(\Delta \mathbf{E}_D) \\ \text{Im}(\Delta \mathbf{E}_D) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可解出 $\Delta \mathbf{E}_D$, 进而得到 \mathbf{E}_D , 将 \mathbf{E}_D 回代到式(11)可解出 \mathbf{I}_G , 从而求解交直流混联系统潮流, 得出发电机的有功出力。因此, 基于以上分析, 可通过快速修正每个换流器的功率设定点 \mathbf{P}_{DC0} 来改变发电机发出的有功功率, 提升系统暂态稳定性。

方程式(7)、式(8)和式(16)描述了交直流系统的动态模型。通常, 该系统模型可以描述成式(22)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: 状态变量矢量 \mathbf{X} 包含了每个发电机的角速度 ω_j 和转子角度 δ_j ; 代数变量矢量 \mathbf{Y} 包括来自发电机的有功功率 \mathbf{P}_G 和来自 VSC 的功率 \mathbf{P}_{DC} , 以及发电机和 VSC 的节点电压 \mathbf{E}_G 和 \mathbf{E}_D ; 控制矩阵 \mathbf{U} 表示在式(7)中换流器的功率设定点 \mathbf{P}_{DC0} 。

3 最优控制

抑制电力系统振荡的常规方法是将某些发电机转速偏差加到换流器功率设定点, 以改变暂态过程中换流器的有功出力提升系统暂态稳定^[30], 该过程可由式(23)表示。

$$\Delta \mathbf{P}_{DC0} = \text{diag}(\mathbf{K}_f) \times (\omega_G - \omega_s) \quad (23)$$

式中: $\text{diag}()$ 为对角矩阵; \mathbf{K}_f 为控制的反馈比例矩阵; ω_G 和 ω_s 为发电机和系统的转速矩阵。在传统的反馈控制中, 它可以提高整个系统的暂态稳定性, 但不能给出提升系统稳定性的最优方案, 也不能充分利用换流器的能力来提高电力系统的稳定性。因此, 本文提出了一种基于 VSC 的 MTDC 系统的新型最优控制方法, 以提升交直流混联系统的暂态稳定性。所提出控制的性能指标定义为

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) \cdot dt \quad (24)$$

式中: \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为设定的半正定矩阵; 状态变量 \mathbf{x} 和控制变量 \mathbf{u} 表示发电机的转子转速偏差和换流器初始功率设定值。为确保交直流混联系统的安全运行, 应满足以下运行约束条件, 包括直流母线电压约束, 直流线电流限制和换流器的功率限制。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{\min}^{\text{DC0}} \leq \text{inv}(\mathbf{Y}_{\text{DC}}) \cdot \mathbf{P}^{\text{DC0}} + \mathbf{V}^{\text{DC0}} \leq \mathbf{V}_{\max}^{\text{DC0}} \\ \mathbf{I}_{\min} \leq (\mathbf{V}_j^{\text{DC}} - \mathbf{V}_i^{\text{DC}}) \cdot \mathbf{Y}_{ji} \leq \mathbf{I}_{\max} \\ \mathbf{P}_{\text{DCmin}} \leq \mathbf{Y}_{\text{MTDC}} \cdot \mathbf{P}^{\text{DC0}} \leq \mathbf{P}_{\text{DCmax}} \end{cases} \quad (25)$$

因此, 通过求解由式(22)、式(24)和式(25)构造的优化问题, 可获得由 MTDC 改善交直流混联系统暂态稳定性的最优控制律。

最优控制率的求解方法如下所述。

为了求解上述构成了最优化问题, 首先需对目标函数, 等式约束和不等式约束进行离散化处理。对于某一时段的最优控制模型表示为

$$\begin{cases} \min J = \mathbf{x}\{(n+1)T\}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}\{(n+1)T\} + \\ \quad \mathbf{u}\{nT\}^T \mathbf{R} \mathbf{u}\{nT\} \\ \text{s.t. } \frac{\mathbf{x}\{(n+1)T\} - \mathbf{x}\{nT\}}{T} = \\ \quad f(\mathbf{x}\{nT\}, \mathbf{y}\{nT\}, \mathbf{u}\{nT\}) \\ \quad g(\mathbf{x}\{nT\}, \mathbf{y}\{nT\}, \mathbf{u}\{nT\}) = 0 \\ \quad \mathbf{V}_{\min}^{\text{DC0}} \leq \mathbf{V}^{\text{DC}}\{nT\} \leq \mathbf{V}_{\max}^{\text{DC0}} \\ \quad \mathbf{I}_{\min} \leq \mathbf{I}\{nT\} \leq \mathbf{I}_{\max} \\ \quad \mathbf{P}_{\text{DCmin}} \leq \mathbf{P}_{\text{DC}}\{nT\} \leq \mathbf{P}_{\text{DCmax}} \end{cases} \quad (26)$$

上述优化模型的物理意义表示为依据系统系统 nT 时刻的转子转速值 $x(nT)$, 施加何种最优控制 $u(nT)$, 使得依据系统模型求取的 $(n+1)T$ 时刻的转子转速偏差的二范数和第 nT 时刻施加的控制量的能耗最小。其中 T 为离散时间间隔(采样时间), 本文中设置 T 为 20 ms, 在系统运动过程中认为在某一离散的时间间隔内状态变量保持不变。由式(26)构成的非线性二次优化问题可由内点法求解, 由 Matlab 中的 fmincon 函数实现。最优控制的实现可由图 2 表示。

4 仿真验证

为验证所提最优控制的有效性, 如图 3 所示, 在经典三机九节点系统^[31]中嵌入三端 MTDC 网络。交流系统的额定电压为 220 kV, 直流系统的额定电压为 ± 200 kV, 系统的额定容量为 100 MVA。三台发电机(记为 G1、G2 和 G3)采用经典模型。如图 3

所示, 三个本地负荷(记为 L1、L2 和 L3)采用恒阻抗模型, 其中 L1 为 $0.9+j1.63$ p.u., L2 为 $1+j0.35$ p.u., L3 为 $1.25+j0.5$ p.u.。MTDC 电网中的三个 VSC 通过母线 5, 7 和 9 连接到交流系统。在正常模式下, 换流器 1 和 2(记为 C1 和 C2)作为整流器运行, 换流器 3(记为 C3)作为逆变器运行。所有换流站均以电压下垂控制模式运行, 与交流侧交换的无功功率保持为零, 确保单位功率因数。其他有关参数见表 1。

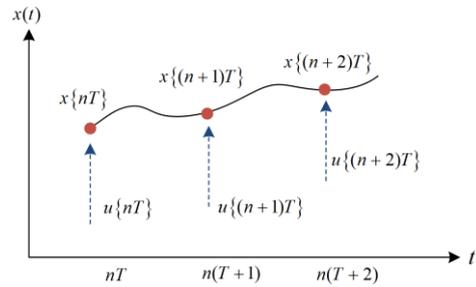


图 2 最优控制实现示意图

Fig. 2 Diagram of optimal control implementation

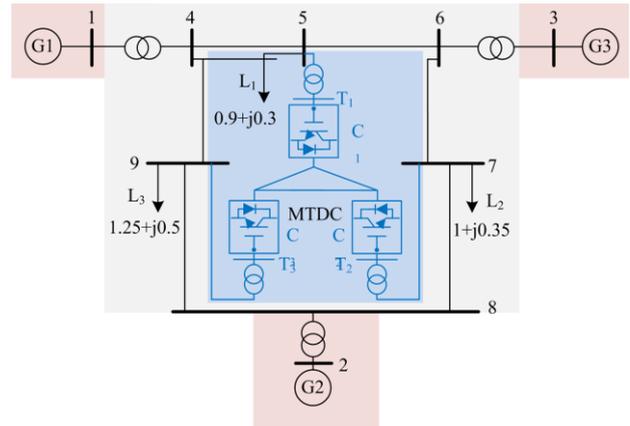


图 3 所研究的交直流混联系统图

Fig. 3 Diagram of the studied AC/DC meshed system

表 1 交直流混联系统的参数

Table 1 Parameters of AC/DC system

符号	名称	数值
T_{j1-3}	发电机惯性(G1~G3)	23.64 s, 6.4 s, 3.01 s
$E'_{q1} \sim E'_{q3}$	暂态电抗(G1~G3)	1.056 0, 1.050 2, 1.017
r_{12-14}	线路阻抗(13, 12, 23)	12 m, 20 m, 15 m
K_{f1-3}	反馈控制参数	5, 5, 5
P_{1-3}^{DC0}	变换器功率参考值	0.4, 0.1, -0.5
K_p, K_i	换流器内环控制参数	5, 10
K_j^{DC}	换流器下垂控制参数	20, 10, 12
P_{1-3}^{DC}	直流端口初始功率	0.429, 0.105, -0.535
L_{cl-3}	换流阀连接等效电抗	0.15 p.u.

4.1 交流系统的金属故障

图 4 表明了交直流混联系统发生金属故障时的动态响应过程。在 $t=0.4\text{ s}$ ，交流母线 4 上发生三相金属性接地，在 $t=0.516\text{ s}$ 时清除。图 4 比较了两种不同的控制方案，即基于传统线性反馈控制和所提的最优控制。最优控制的实施原理可参见图 2。通过采集系统当前的实时转速信息，依据所构建的系统模型，以下一个时刻发电机 G1 和 G2 的转速偏差最小和当前时刻控制能耗最小为目标函数，计算出当前时刻的最优控制指令，在本文中最优控制指令每隔 20 ms 更新一次。为方便起见，优化模型目标函数中的两个自定义的矩阵均选为单位阵。图 4 表明，交流故障期间的不平衡功率导致了同步发电机 G1 和 G2 间转子角度偏差发生振荡。传统基于线性反馈的控制和所提出的最优控制都可以在系统受扰后提升系统暂态稳定性。如图 4(a)和图 4(b)所示，在不加任何辅助控制下，G1 和 G2 之间转子转速偏差和转子功角偏差的振荡幅度明显，并且系统返回到稳定状态需要经历较长的暂态过程。如图 4(a)所示，在不加任何辅助控制下，G1 和 G2 之间转子功角偏

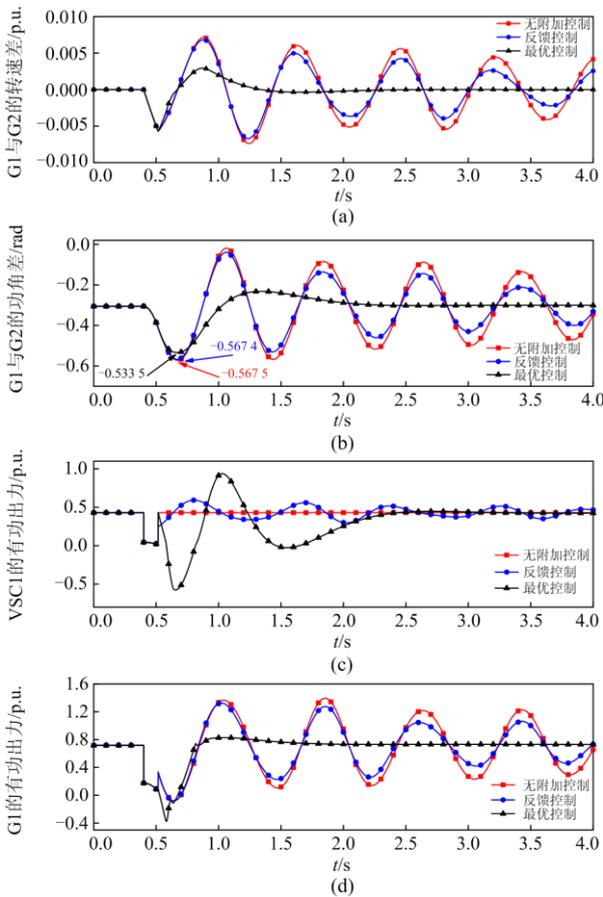


图 4 交流系统金属故障时的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of metallic fault in AC system

差的第一次摇摆达到了 -0.5675 。然而，基于传统线性反馈控制只将该值略微改善至 -0.5674 ，但所提最优控制将该值大大提高至 -0.5335 。因此，所提最优控制可在很大程度上改善系统的暂态稳定，并且有助于系统在交流故障后快速恢复至稳定状态。从图 4(c)和图 4(d)可以清楚地看出，在系统的受扰后，利用所提的最优控制，通过改变 MTDC 各直流端口的有功出力来有效地抑制同步发电机间功角振荡，这在很大程度上改善了整个系统的暂态稳定性。

4.2 负荷的突然扰动

图 5 描述了系统在不同控制方案(即没有任何附加控制，采用传统线性反馈控制以及采用所提的最优控制)下的负荷突然扰动的动态响应过程。在 $t=0.4\text{ s}$ 时，母线 5 处的负荷突然增加到 1.0 p.u. ，并在 $t=0.516\text{ s}$ 时负荷恢复至原来水平。从图 5(a)和 5(b)可以看出，与其他的控制方案相比，采用所提最优控制方案，G1 和 G2 之间的转子功角偏差有明显的衰减。此外，如图 5(c)和 5(d)所示，在系统暂态过程中采用所提最优控制方案，通过对 MTDC 直流端口进行快速有功功率的调制可在很大程度上改善整个交直流混联系统的暂态性能，增强未来交直流混联系统的稳定性。

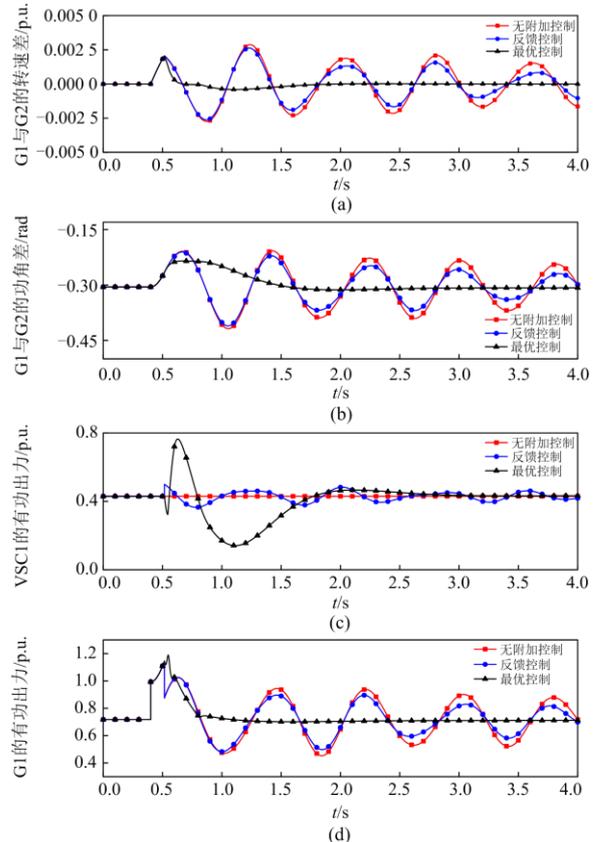


图 5 负荷突然扰动的动态响应

Fig. 5 Dynamic response of sudden load disturbance event

5 结论

本文提出了一种适用于交直流混联系统的最优的控制以提升系统的暂态稳定性。在所提的控制中, 通过 MTDC 直流功率的快速功率调制, 在直流母线电压约束、换流器容量约束、及直流电流约束下来满足发电机的转子速度偏差和控制能量最小, 进而导出最优控制的控制规律。基于三机九节点的交直流混联系统非线性数值仿真表明与基于传统线性反馈控制相比, 所提控制方案在系统故障和负荷突变情况下可有效抑制多机系统的第一摇摆, 提高交直流系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(19): 61-67.
YUAN Xufeng, CHENG Shijie. Multi-terminal DC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-67.
- [2] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. New DC voltage control strategy for multi-terminal flexible DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [3] 张立奎, 张英敏. 混合多端直流输电系统附加控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 128-133.
ZHANG Likui, ZHANG Yingmin. Design of additional controller for hybrid multi-terminal DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 128-133.
- [4] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 基于电压控制特性的电压源型多端直流/交流系统潮流求解[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 42-48.
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Power flow solution for voltage source multi-terminal DC/AC system based on voltage control characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 42-48.
- [5] LI Yujun, WU Lei, LI Jiapeng, et al. DC fault detection in MTDC systems based on transient high frequency of current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 950-962.
- [6] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [7] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 适应分布式电源接入的双模式馈线自动化研究[J]. 供用电, 2019, 36(5): 66-71.
ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. Research on dual-mode feeder automation for distribution networks with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 66-71.
- [8] 马翔, 董康田, 郑金, 等. 离心风机变频调速运行中存在问题及解决方法[J]. 热力发电, 2019, 48(11): 79-83.
MA Xiang, DONG Kangtian, ZHENG Jin, et al. Problems and solution in variable-frequency and speed-regulating operation of centrifugal air fans[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11): 79-83.
- [9] 于汀, 胡林献, 姜志勇. 多端直流系统接线和控制方式对暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 87-91.
YU Ting, HU Linxian, JIANG Zhiyong. Impacts of connection and control modes of multi-terminal DC power transmission system on transient stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 87-91.
- [10] 焦在滨, 姜振超. 多端直流系统直流故障保护研究综述[J]. 四川电力技术, 2017, 40(1): 63-70.
JIAO Zaibin, JIANG Zhenchao. Survey of DC fault protection for multi-terminal DC systems[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(1): 63-70.
- [11] LI Yong, REHTANZ C, RUBERG S, et al. Assessment and choice of input signals for multiple HVDC and FACTS wide-area damping controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1969-1977.
- [12] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.
- [13] SMED T, ANDERSON G Utilizing HVDC to damp power oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 620-627.
- [14] MAO Xiaoming, ZHANG Yao, LIN Guan, et al. Coordinated control of interarea oscillation in the china southern power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 845-852.
- [15] WANG Juanjuan, FU Chuang, ZHANG Yao. Design of WAMS-based multiple HVDC damping control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 363-374.
- [16] HARNEFORS L, JOHANSSON N, ZHANG Lidong, et al.

- Interarea oscillation damping using active-power modulation of multiterminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2529-2538.
- [17] CAO Yijia, WANG Weiyu, LI Yong, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 750-761.
- [18] ERIKSSON R. Coordinated control of multiterminal DC grid power injections for improved rotor-angle stability based on lyapunov theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1789-1797.
- [19] ERIKSSON R, KNAZKINS V, SODER L. Coordinated control of multiple HVDC links using input-output exact linearization[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12): 1406-1412.
- [20] RENDO J, GARRADA A C, ROUCO L. Active power control strategies for transient stability enhancement of AC/DC grids with VSC-HVDC multi-terminal systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4595-4604.
- [21] RENDO J, GARRADA A C, ROUCO L. Reactive-power coordination in VSC-HVDC multi-terminal systems for transient stability improvement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3758-3767.
- [22] TANG Geng, XU Zheng, DONG Huanfeng, et al. Sliding mode robust control based active-power modulation of multi-terminal HVDC transmissions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1614-1623.
- [23] FAN Xinkai, SHU Jin, ZHANG Baohui. Coordinated control of DC grid and offshore wind farms to improve rotor-angle stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4625-4633.
- [24] MOAWWAD A, EL-SAADANY E F, EL-MOURSI M S, et al. Critical loading characterization for MTDC converters using trajectory sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1962-1972.
- [25] YOGARATHINAM A, CHAUDHURI N R. Stability-constrained adaptive droop for power sharing in AC-MTDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1955-1965.
- [26] LEON A E. Short-term frequency regulation and inertia emulation using an MMC-Based MTDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2854-2863.
- [27] 孙威虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.
- SUN Ganghu, WANG Ennan, HE Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptivetransient droop control[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100.
- [28] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.
- WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15.
- [29] 胥威汀, 欧阳雪彤, 苏运掣, 等. 计及 VSC 的交直流混联电网扩展规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 30-36.
- XU Weiting, OUYANG Xuetong, SU Yunche, et al. Expansion planning of AC/DC power grid with VSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 30-36.
- [30] 李鹏, 李鑫明, 陈安伟, 等. 交直流混合微网交直流潮流断面协调最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3755-3763.
- LI Peng, LI Xinming, CHEN Anwei, et al. Coordinated optimal control of AC/DC power interface in AC/DC hybrid microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3755-3763.
- [31] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. Iowa, USA: Iowa State University Press, Ames, 1977.

收稿日期: 2019-09-30; 修回日期: 2020-02-10

作者简介:

章德(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为远距离大规模风电接入电力系统的有功/频率控制; E-mail: d-zhang05@163.com

田国梁(1996—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为直流电力系统控制。E-mail: 1374360814@qq.com

(编辑 姜新丽)