

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181113

含直流潮流控制器的交直流混合系统多目标最优潮流研究

李国庆¹, 王浩翔¹, 王振浩¹, 王鹤¹, 房尧熠²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司通化供电公司, 吉林 通化 134001)

摘要: 直流潮流控制器是直流电网潮流分析与控制领域的研究热点, 一般安装在枢纽换流站的直流母线处, 能够有效提高直流电网的潮流控制自由度。在交直流混合系统中加入直流潮流控制器并在直流电网中建模, 把网络损耗、静态电压稳定指标和电压偏移量作为优化目标进行潮流优化, 依据优化结果协调换流站和直流潮流控制器分步调整交直流系统潮流, 实现了换流站和直流潮流控制器的协调控制。利用所提出的协调控制方法可使系统从某个状态安全稳定地过渡到另一个状态, 在提升系统经济效益的同时, 也可以减小网络损耗、电压偏移量, 提高静态电压稳定裕度。利用 Matlab 对混合系统进行潮流优化, 以一个五端混合系统为例, 验证该方法的有效性。

关键词: 潮流控制自由度; 直流潮流控制器; 多目标潮流; 协调控制

Study of multi-objective optimal power flow of AC-DC hybrid system with DC power flow controller

LI Guoqing¹, WANG Haoxiang¹, WANG Zhenhao¹, WANG He¹, FANG Yaoyi²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Tonghua Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Tonghua 134001, China)

Abstract: DC power flow controller is a research hotspot in the field of DC power flow analysis and control, and it is generally installed on the DC bus at the hub converter station, which can effectively improve the power flow control degree of DC power grid. The DC power flow controller is added to the AC-DC hybrid system to establish the model in the DC grid. The network loss, static voltage stability index and voltage offset are optimized as the optimization targets, and the converter station and the DC power flow controller are coordinated according to the optimization results. The controller adjusts the power flow of AC-DC system step by step, realizing the coordination control of the converter station and DC power flow controller. Using the proposed coordinated control method, the system can be safely and stably shifted from one state to another. While improving the economic benefits of the system, it can also reduce the network loss and voltage offset and increase the static voltage stability margin. Using Matlab to optimize the power flow of the hybrid system and taking a five-terminal hybrid system as an example, the effectiveness of the proposed method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677023).

Key words: power flow control degree; DC Power Flow Controller (DCPFC); multi-objective power flow; coordination control

0 引言

随着直流电网的迅速发展, 直流电网技术以其灵活可控、适应性强等特点成为目前许多学者的研究热点^[1-5]。直流电网是由大量直流端以直流形式互联组成的能量传输系统, 可实现大规模可再生能源发电的接入及大容量远距离的电能量输送。直流电网

已经成为未来电网的重要发展方向和组成部分^[6-9]。

由于直流电网换流站连接多条输电线路, 网络中存在环网, 这样的拓扑结构虽然很大程度上提高了供电可靠性, 却削弱了潮流控制的自由度, 仅由换流站独立控制的控制系统潮流自然分布效率低下、各支路负载率差异较大^[10-11]。加装直流潮流控制器(DC Power Flow Controller, DCPFC)可以显著提高潮流控制的自由度, 避免线路出现过载, 满足系统所有线路都可控的要求^[12-15]。

文献[16]通过在线路中串联可变电阻器, 改变线路参数来调整线路潮流, 但是其只能减小 DCPFC 所在支路的电流, 改变不了电流的方向。文献[17]在控制支路中串联可调节的电压源, 通过调整支路电压来控制支路潮流。文献[18]分别介绍了可变电阻器、直流变压器和串联电压源三种潮流控制器, 对三种拓扑的控制特性进行了阐述。文献[19]对交直流系统进行多目标潮流优化, 通过调整换流站控制系数, 进而优化换流站控制策略。很多文献对换流站的控制策略以及潮流控制器的拓扑结构、控制方法、潮流计算等方面进行了深入的研究, 但鲜有考虑 DCPFC 和换流站的协调控制。

本文首先分析直流电网的潮流控制策略, 其中包括直流电网的控制架构、换流站以及 DCPFC 的控制策略。其次, 提出含 DCPFC 的交直流系统多目标潮流优化模型并进行最优潮流计算, 得到潮流优化的结果。接着, 提出了换流站和 DCPFC 的协调控制方法, 将潮流优化的结果转化成换流站和 DCPFC 的上层控制命令从电网调度中心发出, 最后, 通过算例验证了所提协调控制方法的有效性。

1 含 DCPFC 直流电网的控制架构

1.1 直流电网的控制架构

基于最优潮流直流电网的控制架构如图 1 所示(以三端环网为例)。图中: α 、 β 、 γ 为换流站的控制系数, U_{M1} 、 U_{M2} 为 DCPFC 控制系数, I_{12} 、 I_{13} 、 I_{23} 为加入 DCPFC 后的线路电流(后文中将详细介绍)。首先, 在直流网络中加入 DCPFC。将从交直流系统中得到的电压、电流等数据传送到电网调度中心(Grid Dispatch Centre, GDC)。GDC 根据测量值对整个交直流混合电网进行多目标潮流优化, 依据多目标优化的结果, 调度中心发出指令去调整换流站和 DCPFC 各自的参考值, 其中, $U_{DCref(1,2,3)}$ 分别为第一个换流站到第三个换流站的直流电压参考值; $P_{ref(1,2,3)}$ 分别为第一个换流站到第三个换流站的功率参考值; U_{M1ref} 、 U_{M2ref} 分别为 DCPFC 中 MMC 电压参考值(后文中将详细介绍); I_{DCref} 为直流线路电流参考值。其次, 利用多目标优化的结果去调整换流站和 DCPFC 的控制系数, 实现换流站与 DCPFC 相互配合去控制系统潮流, 如此按照设定的控制周期循环往复, 保持系统运行在最优状态。

1.2 换流站的控制策略

目前, 直流电网中常用的直流电压控制方式包括定电压控制、下垂控制及定功率控制等^[20]。定电压控制是指给定某一个换流站的直流电压值, 该换

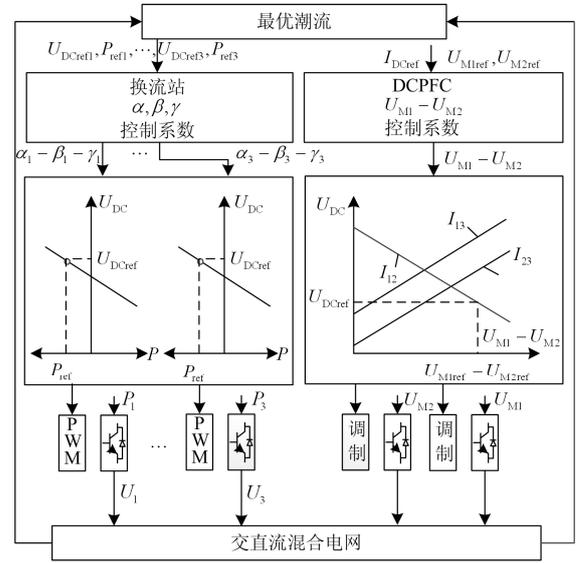


图 1 直流电网控制架构

Fig. 1 Control architecture of DC power grid

流站需要完成维持功率平衡的任务; 下垂控制不需要换流站之间的实时通信, 通过就地控制使各个换流站协调配合控制系统潮流, 但是换流站的直流电压不能稳定在固定值; 定功率控制的换流站自身接收和发出的功率保持恒定, 根据不同的电压值来实现调节输入和输出的电流大小。三种控制方式有各自适用的条件。

本文采用这三种控制方法的统一形式, 实现当系统潮流发生变化, 系统选择相应的控制方式运行在最优状态。如图 2 所示, 可以用一条直线来表示这三种常用的控制方式, 该直线可以由式(1)表示。

$$\alpha U_{DC} + \beta P + \gamma = 0 \quad (1)$$

式中: U_{DC} 为换流站直流电压; P 为换流站有功功率。三种控制方式可以由 α 、 β 、 γ 的不同取值来实现。

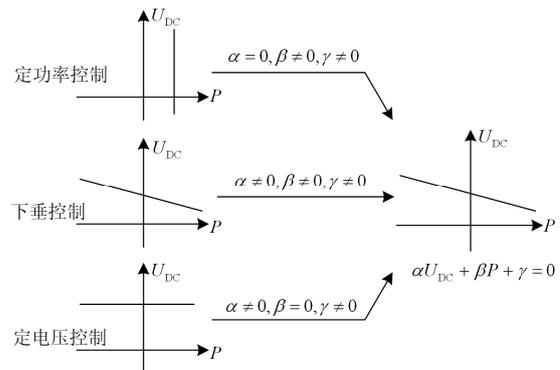


图 2 广义下垂控制方式

Fig. 2 Commonly used DC voltage control mode

1.3 直流潮流控制器的控制策略

本文采用的直流潮流控制器是基于 MMC 的潮流控制器，它是在电压源型 DCPFC 的基础上进行的拓展^[21-22]。该潮流控制器具有额定容量小、不需与外部电源连接和便于扩展等优点，拓扑图如图 3 所示。假设直流系统为三端环网结构，接线方式为伪双极式，DCPFC 的位置在换流站 1 处，主要包括两个 MMC 和一个交流变压器，其拓扑具有公共的交流母线。MMC1 和 MMC2 的直流部分分别串入到换流站 1、换流站 2 的支路中和换流站 1、换流站 3 的支路中。MMC1 和 MMC2 的交流部分共同连接交流变压器来实现自身功率平衡。MMC1 和 MMC2 分别由 6 个桥臂组成，每个桥臂又由相同数目的全桥型子模块级联组成。

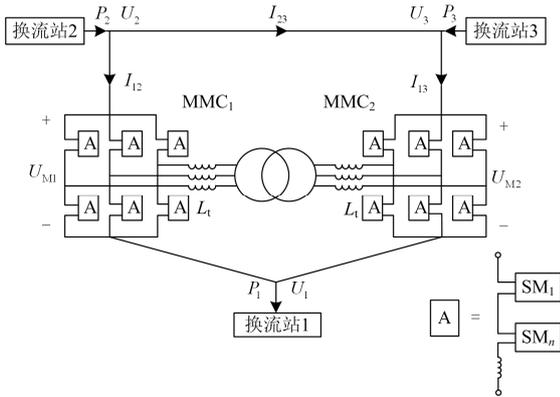


图 3 DCPFC 的拓扑结构

Fig. 3 Topology of DCPFC

通过改变 DCPFC 中的 MMC1 和 MMC2 串入到线路中的电压 U_{M1} 、 U_{M2} 来控制 U_2 和 U_3 对 U_1 的电压值，进而改变线路电流 I_{12} 、 I_{13} 、 I_{23} 的大小和方向，最后实现潮流的控制，该方法也可适用于多环网的直流系统。

DCPFC 通过线路电流指令值求得的端口电压指令值作为控制策略的初始值，用以进行潮流控制。假设 MMC1 为整流端，用来控制 MMC1 端口的直流电压，MMC2 为逆变端，用来建立稳定的交流电压。通过定直流电压控制和交流电压控制来保证 MMC1 和 MMC2 正常工作，控制系统潮流。

2 含 DCPFC 的交直流系统多目标潮流优化

2.1 含 DCPFC 交直流系统多目标潮流优化数学模型

通常以网损最小为单一目标^[23]进行的潮流优化不足以满足生产生活需要，选取网络损耗、电压偏移量、静态电压稳定裕度作为目标函数建立如式

(2)一式(15)所示的含 DCPFC 的交直流系统多目标潮流优化模型^[24-25]。

1) 系统最小网损方程包含支路 k 的网损、第 i 个换流站的网损以及直流潮流控制器的损耗。

$$\begin{aligned} \text{Min. } P_{\text{loss}} = & \sum_{k \in N_B} P_{k,\text{loss}} + \sum_{i \in N_{\text{VSC}}} P_{i,\text{loss}} + P_{\text{DCPFC,loss}} = \\ & \sum_{k \in N_B} g_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) + \\ & \sum_{i \in N_{\text{VSC}}} (a + bI_{ci} + cI_{ci}^2) + \sum_{k \in N_C} U_{Mk} I_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中： P_{loss} 表示系统的总网损； $P_{k,\text{loss}}$ 表示支路 k 的网损； $P_{i,\text{loss}}$ 表示第 i 个换流站的网损； g_k 表示支路 k 的电导，其两端电压幅值为 U_i 和 U_j ； I_{ci} 为第 i 个换流站的电流； a 、 b 、 c 为计算换流器损耗的系数； N_B 为所有支路集合； N_{VSC} 为换流站节点集合； $P_{\text{DCPFC,loss}}$ 表示直流潮流控制器的损耗； N_C 为加装 DCPFC 的换流站所连接的所有支路集合； U_{Mk} 为加装 DCPFC 线路中 MMC 两端电压值； I_k 为加装 DCPFC 的换流站所连接的线路的电流值。

2) 系统电压偏移量最小方程。

$$\text{Min. } \Delta U = \sum_{i=1}^{N_A} \left[\frac{U_i - U_i^{\text{spec}}}{U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}} \right]^2 \quad (3)$$

式中： U_i^{spec} 表示节点 i 的期望电压值； U_i^{max} 表示节点 i 的最大电压； U_i^{min} 表示节点 i 的最小电压； ΔU 为电压偏移量； N_A 为所有节点集合。

3) 静态电压稳定裕度最大方程。

$$\text{Max. } U_{\text{SM}} = \delta_{\text{min}} \quad (4)$$

式中， δ_{min} 为收敛潮流的雅可比矩阵的最小奇异值。

4) 采用极坐标形式的交流节点功率方程。

$$0 = P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{\substack{j \in N_i \\ i \in N_A, i \neq j}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$0 = Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{\substack{j \in N_i \\ i \in N_{PQ}}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中： θ_{ij} 为 i 、 j 两节点的相角差； P_{Gi} 和 P_{Di} 分别为节点 i 的有功发电功率和负荷功率； Q_{Gi} 和 Q_{Di} 分别为节点 i 的无功发电功率和负荷功率； G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列的实部和虚部； N_{PQ} 为 PQ 节点集合； N_i 表示与节点 i 相连的所有节点的集合(包括自身)； s 表示平衡节点。

5) 直流系统方程。

DCPFC 的安装位置和输出支路数均会对分析结果产生一定影响。其中 DCPFC 的安装位置会影响

到该换流站在直流侧电流输出的可控性, 使得直流侧电流不仅可以通过调节直流系统中的直流电压实现, 也可以通过调节DCPFC实现, 降低了直流电压越限的风险。

五端直流系统的等效图如图4所示, DCPFC安装于换流站5, 其输出支路数共4条, 实现了换流站5和其余任意换流站的两两连接, 这样做的目的是为了能够实现换流站5和任意换流站间的功率分配, 便于达到最优值的调整目的。根据本文所采用DCPFC的特点, DCPFC通过增加MMC个数可以较为容易地扩展成多端口直流潮流控制器, 适合用于直流电网。 R_{12} 、 R_{15} 、 R_{23} 、 R_{25} 、 R_{35} 、 R_{45} 分别为6条支路上的电阻值; 直流系统中电流流向如图4中 I_{12} 、 I_{15} 、 I_{23} 、 I_{25} 、 I_{35} 、 I_{45} 所示; U_{M3} 、 U_{M4} 、 U_{M5} 、 U_{M6} 分别为安装在换流站5处的DCPFC在每个线路中等效的MMC电压值。

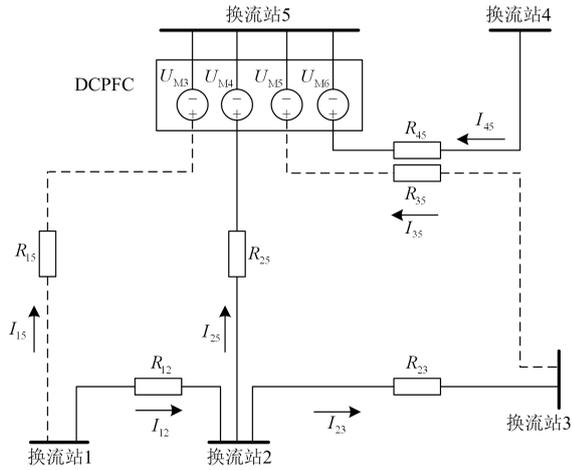


图4 加入DCPFC后的环网式直流系统

Fig. 4 Ring DC system after adding the DCPFC

加装潮流控制器后加装支路电流公式为

$$\begin{cases} I_{15} = \frac{U_1 - U_5 - U_{M3}}{R_{15}} \\ I_{25} = \frac{U_2 - U_5 - U_{M4}}{R_{25}} \\ I_{35} = \frac{U_3 - U_5 - U_{M5}}{R_{35}} \\ I_{45} = \frac{U_4 - U_5 - U_{M6}}{R_{45}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 分别代表换流站1、换流站2、换流站3、换流站4、换流站5的电压大小。加装支路传输功率为

$$\begin{cases} P_{15} = \frac{U_5(U_1 - U_5 - U_{M3})}{R_{15}} \\ P_{25} = \frac{U_5(U_2 - U_5 - U_{M4})}{R_{25}} \\ P_{35} = \frac{U_5(U_3 - U_5 - U_{M5})}{R_{35}} \\ P_{45} = \frac{U_5(U_4 - U_5 - U_{M6})}{R_{45}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{15} 、 P_{25} 、 P_{35} 、 P_{45} 分别为换流站1与换流站5, 换流站2与换流站5, 换流站3与换流站5, 换流站4与换流站5之间的传输功率。

加装DCPFC会在系统中增加新的节点, 故采用等效注入功率法进行潮流计算。没有加入潮流控制器前的直流电网节点 i 和 j 的注入功率如式(9)。

$$\begin{cases} P_i = U_i(U_j - U_i)Y_{ij} + \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^m U_i(U_h - U_i)Y_{hi} \\ P_j = U_j(U_i - U_j)Y_{ij} + \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^n U_j(U_h - U_j)Y_{hj} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_i 、 P_j 为节点 i 、 j 的注入功率; m 、 n 分别表示与节点 i 、 j 相连的节点; Y_{ij} 为支路 L_{ij} 的导纳; Y_{hi} 为支路 L_{hi} 的导纳; Y_{hj} 为支路 L_{hj} 的导纳。

加入潮流控制器后的注入功率如式(10)所示。

$$\begin{cases} P'_i = U_i(U_j - U_{Mk} - U_i)Y_{ij} + \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq j}}^m U_i(U_h - U_i)Y_{hi} \\ P'_j = U_j(U_i + U_{Mk} - U_j)Y_{ij} + \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^n U_j(U_h - U_j)Y_{hj} \end{cases} \quad (10)$$

式中, P'_i 、 P'_j 分别为加入潮流控制器后节点 i 、 j 的注入功率。

由等效注入功率法计算潮流控制器对节点 i 、 j 注入功率的修正量, 由式(11)表示。由此, 潮流控制器对系统的影响转化成为加入DCPFC后两端节点的等效附加功率。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P'_i - P_i = -U_i U_{Mk} Y_{ij} \\ \Delta P_j = P'_j - P_j = U_j U_{Mk} Y_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

式中, ΔP_i 、 ΔP_j 分别为加入潮流控制器后节点 i 、 j 的注入功率修正量。

6) 节点电压幅值的约束条件。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}, \quad i \in N_A \quad (12)$$

式中, $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分别表示节点 i 电压的下限值和

上限值。

7) 节点的有功和无功功率条件。

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, i \in N_G \cup N_C \cup N_{VSC} \quad (13)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max}, i \in N_G \cup N_C \quad (14)$$

式中： $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别表示节点*i*注入有功功率的上限值和下限值； $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$ 表示节点*i*的注入无功功率， $Q_{i,\max}$ 、 $Q_{i,\min}$ 分别表示节点*i*注入无功功率的上限值和下限值； N_G 、 N_C 分别代表发电机节点集合、无功补偿电容器节点集合。

8) 变压器支路*k*的变比的约束条件。

$$T_{k,\min} \leq T_k \leq T_{k,\max}, k \in N_T \quad (15)$$

式中： T_k 表示变压器支路*k*的变比； $T_{k,\min}$ 和 $T_{k,\max}$ 分别表示 T_k 的下限值和上限值； N_T 为变压器支路集合。

将等效注入功率法加入到牛顿拉夫逊法潮流计算当中，潮流计算的流程图如图5所示。

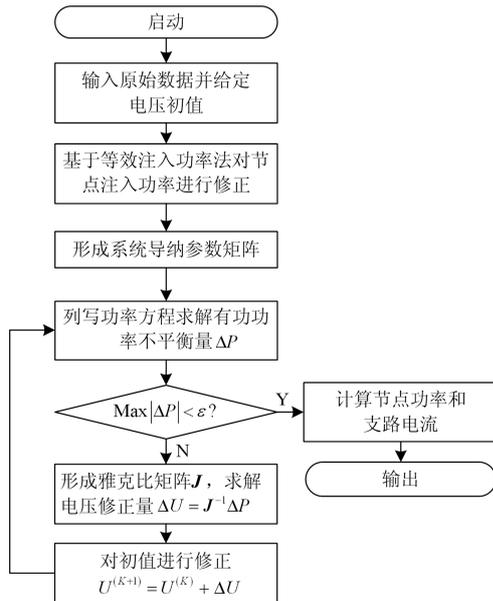


图5 潮流计算流程图

Fig. 5 Flow chart of power flow calculation

文献[26]利用智能潮流优化算法进行电力系统最优潮流计算，但在含有DCPFC的多目标潮流优化数学模型中，连续变量和离散变量是同时存在的，智能优化算法在处理连续变量时存在计算效率不够高的缺点，故本文采用内点法和NSGA2相结合的交替求解算法。内点法在处理连续变量时具有较好的收敛性，NSGA2在处理离散变量时存在优势，两者结合会具有更高的计算效率并得到精度很高的解，这在大量仿真中已得到验证。本文所采用混合优化算法的流程图如图6所示。

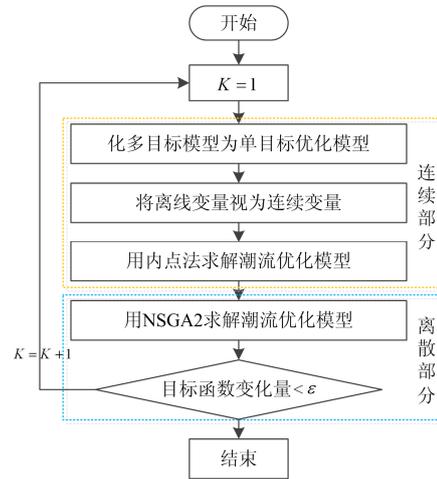


图6 模型求解流程图

Fig. 6 Flow chart of model solving

图6中，将模型分为两部分进行考虑：连续优化部分与离散优化部分。由于内点法具有收敛性好、鲁棒性强，但难以处理离散变量的特点，因此在连续优化部分采用内点法将多目标转化为单一目标的潮流优化模型进行求解，即通过对每个目标函数进行加权处理，将多目标问题转化为单目标问题。而考虑到遗传算法具有很强的离散变量处理能力和全局收敛的特点，因此在离散优化部分采用NSGA2算法求解仅含有离散变量的多目标潮流优化模型。

2.2 直流潮流控制器与换流站的协调配合

直流潮流控制器和换流站的协调控制旨在控制直流电网的稳态潮流，以避免过载或优化直流电网的内部功率。

GDC根据最优潮流的结果，发出控制命令对换流站和DCPFC进行相应的调整，调整后可以使直流电网运行在最优状态。这些控制指令将定期反馈给每个可控的换流站或DCPFC。但是，需要注意的是，DCPFC和换流站的协调控制无法瞬时完成，为了系统的稳定，需要分步进行调整。

换流站采用广义下垂控制，换流站的有功功率和直流电压的关系为

$$U_{DC} = U_{DC,\max} - \frac{\beta}{\alpha}(P - P_{\text{ref}}) \quad (16)$$

式中： $U_{DC,\max}$ 为换流站直流电压最大值； P_{ref} 为有功功率参考值。各个换流站都采用广义下垂控制时，每个换流站所承担的功率差额跟下垂系数是相关的，每个换流站所采用的下垂系数，决定了当系统出现波动时，功率的差额在各个换流站之间分配的比例。

假设直流电网运行正常，且初始状态为A。若

此时根据最优潮流计算结果, 直流电网需要调整至下一个状态 B。由于进行了多目标潮流优化, A 状态和 B 状态都能够满足约束条件, 不会发生电压越限等不正常运行情况。但在整个系统的状态从 A 过渡到 B 的过程中, 各个换流站和 DCPFC 是分步进行调整的。在调整过程中, 需要始终保证整个系统能够满足所有的约束条件, 不会因为状态调整而出现不正常的运行状态。

本文采用如图 7 所示的协调控制策略来实现换流站和 DCPFC 的协调控制, 保证运行状态调整过程中直流电网不会出现越限的情况。分步调整的目的是为了让现有的直流系统潮流在向最优潮流调整的过程中, 避免直流系统中各个状态越限, 这也是本文解决的主要问题之一, 即如何保证系统平稳地从当前状态向最优状态过渡。如图 7 所示: 首先调整指定换流站由初始状态到下一个状态, 并检验该换流站调整后直流电网是否越限, 如果不越限, 则继续进行下一个换流站的调整; 如果越限, 则放弃调整该换流站, 并将其置于调整换流站序列的末尾, 先调整下一个换流站。以此类推, 直至所有换流站都调整完毕。最后, 再对 DCPFC 进行调整, 使直流电网从 A 状态调整至 B 状态。假如遍历过所有路

径后, 系统无法从当前稳态平稳地过渡到最优稳态, 则应该进一步修改最优潮流计算中的限制条件, 这在极端复杂的多端直流系统是客观存在的, 本文所示系统是网络结构较为简单的五端系统, 暂时不属于本文的主要研究目标。

3 算例

以五端直流电网为例验证本文所提出方法的有效性。换流站 1 至换流站 5 如图 8 所示, 将 DCPFC 加在换流站 5 处, 系统的参数如表 1 所示。

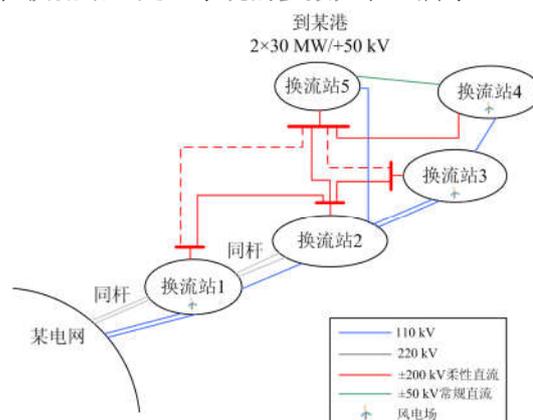


图 8 直流电网系统图

Fig. 8 DC grid system

表 1 直流系统参数表

Table 1 Parameters of DC system

首端 节点号	末端 节点号	支路	电阻/ Ω	距离/ km	载流限 值/A
1	2	L ₁₂	1.05	35	556
1	5	L ₁₅	2.31	77	556
2	3	L ₂₃	0.51	17	556
2	5	L ₂₅	0.34	39	1 150
3	5	L ₃₅	0.60	20	556
4	5	L ₄₅	1.20	40	556

将系统中无 DCPFC 定义为情况一; 加入 DCPFC, 把 DCPFC 的控制值设定为固定值定义为情况二; 加入 DCPFC, 对 DCPFC 和换流站进行协调控制定义为情况三。

表 2 为有、无 DCPFC 情况下系统潮流。由表 2 可以看出: 加入 DCPFC 后, 节点功率和电压发生改变, 说明 DCPFC 可以改变线路的潮流分布, 对潮流控制起到了补充作用。将情况二和情况三进行多目标潮流优化给出表 3。通过表 3 可知: 进行协调控制的系统总网络损耗更低, 由于采取分步调整的控制手段, 通过优化, 得到了更合理的潮流分布, 所以电压偏移量更小, 静态电压稳定裕度更高, 系

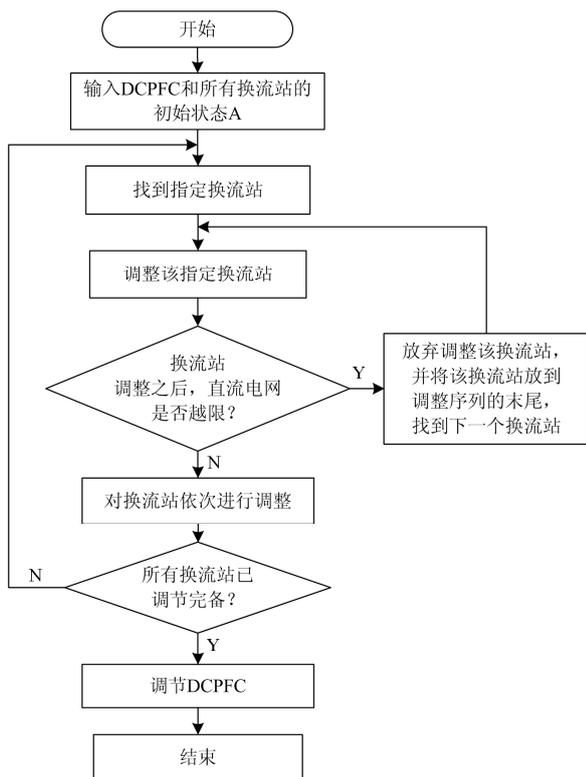


图 7 协调控制流程图

Fig. 7 Flow chart of coordinated control

统的运行状态最优，这体现了协调控制的优越性。

表 2 有、无 DCPFC 情况下系统潮流

Table 2 Power flow of the system with and without DCPFC

	直流节点号	节点功率/MW	直流电压/p.u.
情况一	1	-98.63	0.989
	2	-302.90	0.996
	3	102.45	0.996
	4	-97.89	0.991
	5	397.12	1.004
情况二	1	-99.28	0.993
	2	-301.50	0.997
	3	101.24	0.997
	4	-98.55	0.995
	5	398.32	1.005

表 3 系统控制方式优化前后目标函数的对比

Table 3 Objective functions comparison before and after system control mode optimization

	DCPFC 设定值/kV	总网络 损耗/MW	电压 偏移量	静态电压 稳定裕度
情况二	1.170	8.426 5	3.70	3.60
情况三	0.168	3.854 5	3.66	3.69

在系统正常运行过程中对系统进行协调控制，采用协调控制的换流站功率变化曲线如图 9 所示，DCPFC 的功率变化如图 10 所示，加入 DCPFC 的换流站电压变化如图 11 所示。1.5 s 时，首先调整换流站 5，换流站 5 由初始状态调整到 350 MW，经检验系统没有出现不正常运行情况，则换流站 5 可以调整。在 2.5 s 时调整换流站 3，换流站 3 由初始状态调整到 150 MW，经检验系统没有出现不正常运行情况，则换流站 3 可以调整。之后，在 3.5 s、4.5 s、5.5 s 时将换流站 1、换流站 4 以及换流站 2 由初始状态分别调整到-160 MW、-120 MW 和-220 MW，检验后系统没有出现不正常运行情况，故换流站可以按照顺序进行调整。最后，调整 DCPFC，改变

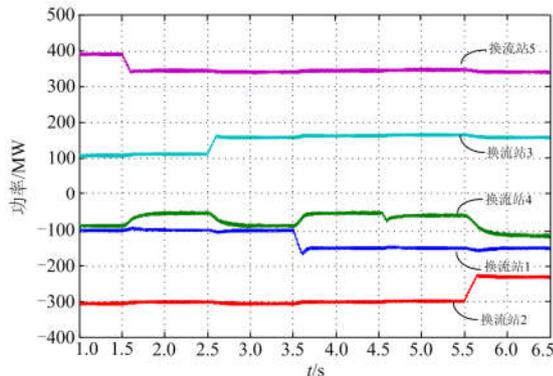


图 9 采用协调控制时各换流站功率变化

Fig. 9 Converter station power changes with coordinated control

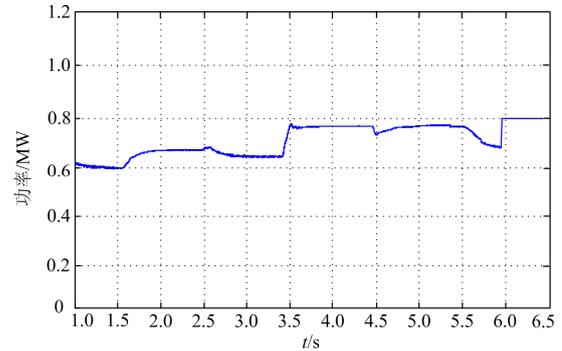


图 10 采用协调控制时 DCPFC 的功率变化

Fig. 10 DCPFC power changes with coordinated control

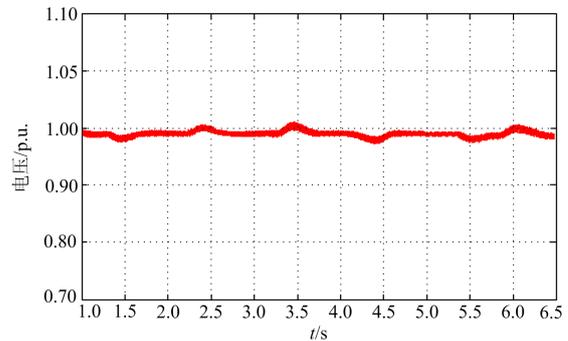


图 11 采用协调控制时换流站 5 电压变化

Fig. 11 Converter station 5 voltage changes with coordinated control

DCPFC 的初始控制值。结果表明，各个换流站和潮流控制器都从初始状态成功过渡到了下一个状态，证明所提出协调控制方法的有效性。

4 结论

本文对加入 DCPFC 的直流电网的潮流进行研究，推导出直流侧含 DCPFC 的网络方程，利用等效注入功率法，构建了直流侧含 DCPFC 的交直流混合系统多目标潮流的优化模型。利用内点法和 NSGA2 相结合的优化算法对交直流网络进行潮流优化并提出了换流站和 DCPFC 的协调控制方法。最后，搭建了五端交直流系统模型，利用 Matlab 对其进行潮流优化，仿真证明换流站和 DCPFC 的调整可以互不影响，采用协调控制调整系统潮流可以得到理想的潮流分布，验证了本文潮流优化和协调控制的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 刘先正, 王兴成, 温家良, 等. 含新能源直流电网的状态反馈控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 115-121.

- LIU Xianzheng, WANG Xingcheng, WEN Jialiang, et al. State feedback control of DC grid with renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(14): 115-121.
- [2] MATTHIAS K, ROGER W, GORAN A, et al. Multiterminal HVDC networks — what is the preferred topology[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(1): 406-413.
- [3] ENRIQUE A, BEHZAD K, LUIS M. A new VSC-HVDC model for power flows using the Newton-Raphson method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2602-2612.
- [4] 李国庆, 龙超, 陈洪涛. 计及直流电网线路损耗的直流潮流控制器安装位置选择[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 43-49.
- LI Guoqing, LONG Chao, CHEN Hongtao. Installation position selection of DC power flow controller considering the line-loss of DC grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 43-49.
- [5] YAO Z Q, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [6] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(7): 1760-1771.
- TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [7] 姚良忠, 吴婧, 鲁宗相, 等. 含大规模风电场接入的多端直流系统对交流系统频率调节的作用[J]. *高电压技术*, 2016, 42(10): 3038-3044.
- YAO Liangzhong, WU Jing, LU Zongxiang, et al. Effect of MTDC system integrating large scale wind power on AC system frequency control[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(10): 3038-3044.
- [8] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(13): 7-12, 185.
- WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(13): 7-12, 185.
- [9] 鲍威, 凌卫家, 张静, 等. 含 VSC-MTDC 的交直流混合电网潮流计算模型及稀疏性处理技术[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(5): 43-48.
- BAO Wei, LING Weijia, ZHANG Jing, et al. Power flow calculation model and sparse matrix disposal techniques for AC/DC hybrid power system with VSC-MTDC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(5): 43-48.
- [10] KUMARS R, ARASH M, ALVARO L, et al. Towards fully controllable multi-terminal DC grids using flexible DC transmission systems[C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014, Pittsburgh, USA: 5312-5316.
- [11] ENRIQUE A, BEHZAD K, LUIS M. A new VSC-HVDC model for power flows using the Newton-Raphson method[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2602-2612.
- [12] 许烽, 徐政, 刘高任. 新型直流潮流控制器及其在环网式直流电网中的应用[J]. *电网技术*, 2014, 38(10): 2644-2650.
- XU Feng, XU Zheng, LIU Gaoren. A new type of DC power flow controller and its applications in meshed DC grids[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 2644-2650.
- [13] 李国庆, 边竞, 王鹤, 等. 一种基于 MMC 的新型直流潮流控制器[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2107-2114.
- LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. A new type DC power flow controller based on MMC[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2107-2114.
- [14] DENG N, WANG P Y, ZHANG X P. A DC current flow controller for meshed modular multilevel converter multiterminal HVDC grids[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, 1(1): 43-51.
- [15] CHEN W, ZHU X, YAO L Z, et al. A novel interline DC power-flow controller (IDCPFC) for meshed HVDC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(4): 1719-1727.
- [16] VEILLEUX E, OOI B T. Power flow analysis in multi-terminal HVDC grid[C] // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (NAPS), March 20-23, 2011, Phoenix, AZ, USA: 1-7.
- [17] 龙超, 李国庆, 孙银锋, 等. 基于等效注入功率法的含直流潮流控制器的直流电网潮流计算方法研究[J]. *智能电网*, 2015, 3(3): 208-213.
- LONG Chao, LI Guoqing, SUN Yinfeng, et al. Power flow calculation of DC grid with DC power flow controller based on equivalent power injection method[J]. *Smart Grid*, 2015, 3(3): 208-213.
- [18] MU Q, LIANG J, LI Y L, et al. Power flow control devices in DC grids[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-7.
- [19] 王鹤, 刘禹彤, 李国庆, 等. 基于最优潮流的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2017,

41(11): 150-155.
WANG He, LIU Yutong, LI Guoqing, et al. Control strategy for VSC-based multi-terminal DC transmission system based on optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 150-155.

[20] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.

[21] 许烽, 徐政. 一种适用于多端直流系统的模块化多电平潮流控制器[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 95-102.
XU Feng, XU Zheng. A modular multilevel power flow controller for multi-terminal HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 95-102.

[22] JUN C, WENJUAN D, HAIFENG F W, et al. Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids With VSC-MTDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3047-3055.

[23] CARRIZOSA M J, NAVAS F D, DAMM G, et al. Optimal power flow in multi-terminal HVDC grids with offshore wind farms and storage devices[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 291-298.

[24] 吴素衣, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.

[25] WANG F, LE ANH T, LINA BERTLING T, et al. A new approach for benefit evaluation of multiterminal VSC-HVDC using a proposed mixed AC/DC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 432-443.

[26] 王子琪, 陈金富, 张国芳, 等. 基于飞蛾扑火优化算法的电力系统最优潮流计算[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3641-3647.
WANG Ziqi, CHEN Jinfu, ZHANG Guofang, et al. Optimal power flow calculation with moth-flame optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3641-3647.

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-10-28

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统的安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化; E-mail: LGQ@mail.nedu.cn

王浩翔(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统; E-mail: 757771657@qq.com

王振浩(1964—), 男, 教授, 主要研究方向为柔性直流输电技术。E-mail: zhenhaowang@126.com

(编辑 周金梅)