

## 交直流系统的动态无功优化

颜伟<sup>1</sup>, 张海兵<sup>1</sup>, 田甜<sup>2</sup>, 王圣江<sup>3</sup>, 程彬<sup>4</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆市 400030;

2. 重庆电力设计院, 重庆市 400030; 3. 云南电网调度中心, 云南省昆明市 650011; 4. 77206 部队, 云南省昆明市 650011)

**摘要:** 考虑直流输电系统对功率与电压的调节能力, 建立了交直流系统的动态无功优化模型。模型的目标函数为交直流电网的全天网损最小, 约束包括交直流系统的潮流约束、所有直流变量的控制约束、离散控制变量动态调节次数约束及节点电压的安全约束。模型求解是一个多时段非线性混合整数规划问题。以混合算法为基础, 提出了交直流系统的动态无功优化混合智能算法。以 PSASP 36 节点系统为例, 通过仿真计算验证了所建模型和算法的有效性, 说明了动态无功优化在交直流输电网络中具有更大的降损潜力。

**关键词:** 动态无功优化; 交直流输电系统; 混合智能算法; 功率协调

**中图分类号:** TM721.3; TM761

### 0 引言

随着国内“西电东送”工程建设的进行, 大量的直流输电线路将会投入运行, 从而形成多个复杂的交直流混合输电系统。由于直流输电系统在传输有功功率的同时, 换流站会大量吸收无功功率, 相应地可能对交流系统的无功分布及电压波动产生很大影响<sup>[1]</sup>, 因而交直流系统的电压无功控制问题受到普遍关注。

相对交流线路, 直流输电线路的传输功率及运行方式具有较强的可控性, 相应为交直流并联输电线路的潮流优化控制提供了有利的控制手段。因此, 交直流系统的无功优化不仅可以通过无功电源及调压设备的优化控制, 在满足系统电压安全性的基础上, 降低有功损耗, 使电网无功潮流分布更加合理, 而且还可以通过对直流系统运行条件的优化, 协调交直流并联线路的有功传输功率, 以进一步降低有功损耗。

现有无功优化方面的文献主要集中在纯交流系统的静态与动态无功优化<sup>[2-5]</sup>, 而对交直流系统的无功优化研究较少。文献[6]单纯从直流系统本身出发, 当传输有功功率一定时, 通过对系统运行时控制量的给定值进行优化, 从而减小直流系统吸收的无功功率, 这样的优化直接从无功功率的需求角度考虑网络经济性, 但没有考虑网络的有功损耗。文献[7]提出了交直流混合系统的静态无功优化模型, 并采用粒子群算法求解, 模型中假设触发角和熄弧角

为给定常数, 没有充分考虑直流控制方式的优化选择以及交直流输电通道传输功率的协调分配问题。文献[8]提出了交直流系统的无功优化二次模型, 但是用内点法进行求解的, 而没有考虑控制变量的离散性。迄今为止, 还没有见到交直流系统动态无功优化的相关研究报道。由于电网互联, 负荷波动较大, 从一天的角度来考虑电压无功的动态优化问题更符合实际需求。因此, 实现交直流混合系统的动态无功优化具有重要的实际指导意义。

本文在交流系统动态无功优化模型基础上, 充分考虑直流输电线路的运行特性, 建立了交直流系统的动态无功优化模型。该交直流模型仍然具有交流模型的多阶段非线性混合整数规划特点, 因此, 本文采用文献[5]的复合智能优化算法进行求解。

### 1 交直流混合输电系统的动态无功优化模型

本文在常规交流系统的动态无功优化模型基础上建立交直流系统的动态无功优化新模型。其中, 重点考虑直流输电系统的运行特性以及对其电压和功率调节能力的充分利用。假设换流站的所有直流控制变量(包括直流电流、电压、功率、控制角和换流变压器变比)都完全可控制, 不受直流系统运行方式的影响; 而交流部分的模型同文献[5]。附录 A 图 A1 中给出了直流输电系统换流站的结构及功率、电流方向定义。

结合上述假设, 本文所建动态无功优化模型如下。

目标函数为全天能量损耗最小:

收稿日期: 2008-10-31; 修回日期: 2009-02-26。

国家自然科学基金资助项目(50577073)。

$$\min f = \sum_{t=0}^{23} \left[ \sum_{ij \in S_L} P_{Lij,t} + \sum_{ij \in S_T} P_{Tij,t} + \sum_{ij \in \phi_{dL}} P_{dij,t} \right] t \quad (1)$$

式中： $S_L$  和  $S_T$  分别为交流系统线路和变压器支路集合； $\phi_{dL}$  为直流网络支路集合； $ij$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的支路； $P_{dij,t}$  为第  $t$  时段直流系统的功率损耗。

约束条件如下：

1) 交流系统(不含交直流电网的连接节点)的运行约束

$$P_{Gi,t} - P_{Di,t} - \sum_{ij \in S_{Li}} P_{Lij,t} - \sum_{ij \in S_{Ti}} P_{Tij,t} = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi,t} + Q_{Cri,t} - Q_{Di,t} - \sum_{ij \in S_{Li}} Q_{Lij,t} - \sum_{ij \in S_{Ti}} Q_{Tij,t} = 0 \quad (3)$$

$$V_{\min,t} \leq V_t \leq V_{\max,t} \quad (4)$$

$$Q_{\min,t} \leq Q_t \leq Q_{\max,t} \quad (5)$$

$$K_{\min,t} \leq K_t \leq K_{\max,t} \quad (6)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |C_{m,t+1} \oplus C_{m,t}| \leq M_m \quad (7)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |T_{l,t+1} - T_{l,t}| \leq K_l \quad (8)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |T_{l,t+1} - T_{l,t}| \leq k_l \quad (9)$$

式中： $S_{Li}$  和  $S_{Ti}$  分别为与节点  $i$  相连的线路集合和变压器支路集合；其他变量含义见文献[5]。

2) 交直流系统的关联约束(即交直流电网连接节点的功率平衡方程)

$$P_{Gi,t} - P_{Di,t} - \sum_{ij \in S_{Li}} P_{Lij,t} - \sum_{ij \in S_{Ti}} P_{Tij,t} - s_{Pi} P_{di,t} = 0 \quad (10)$$

$$Q_{Gi,t} + Q_{Cri,t} - Q_{Di,t} - \sum_{ij \in S_{Li}} Q_{Lij,t} - \sum_{ij \in S_{Ti}} Q_{Tij,t} - s_{Qi} Q_{di,t} = 0 \quad (11)$$

式中： $i \in \phi_b$ ； $\phi_b$  为交直流电网的连接节点集合； $P_{di,t}$  和  $Q_{di,t}$  分别为第  $t$  时段换流器  $i$  的有功功率和无功功率；当换流器  $i$  为整流器时， $s_{Pi} = 1$ ，为逆变器时， $s_{Pi} = -1$ ；不管换流器是整流器还是逆变器都需要吸收无功功率，所以  $s_{Qi} = 1$ 。

3) 直流系统的运行约束

换流器的基本方程<sup>[8]</sup>如下：

$$V_{di,t} - k_{bi,t} \left[ \frac{3\sqrt{3}}{2} k_{di,t} V_{i,t} \cos \alpha_{di,t} - \frac{3}{2} x_{di,t} I_{di,t} \right] = 0 \quad (12)$$

$$S_{di,t} - k_{pi,t} \frac{3\sqrt{3}}{2} k_{di,t} V_{i,t} I_{di,t} = 0 \quad (13)$$

$$P_{di,t} - k_{pi,t} V_{di,t} I_{di,t} = 0 \quad (14)$$

$$S_{di,t}^2 - P_{di,t}^2 - Q_{di,t}^2 = 0 \quad (15)$$

式中： $i \in \phi_b$ ； $k_{di,t}$ ， $k_{bi,t}$ ， $k_{pi,t}$  分别为第  $t$  时段换流变压器  $i$  的变比、换流器每极中 6 脉动换流器的个数和换流器的极数； $V_{i,t}$  为第  $t$  时段连接节点  $i$  的电压幅值； $\cos \alpha_{di,t}$  为第  $t$  时段控制角  $i$  的余弦；控制角  $\alpha$  包括整流侧的触发角  $\alpha$  和逆变侧的熄弧角  $\beta$ ； $x_{di,t}$  为换相电抗； $V_{di,t}$  和  $I_{di,t}$  分别为第  $t$  时段直流系统  $i$  侧的直流电压和直流电流； $S_{di,t}$  为第  $t$  时段换流器  $i$  的视在功率；为计及换相重叠现象而引入的系数，一般取 0.995。

直流网络方程如下：

$$s_{Pi} I_{di,t} - \sum_{ij \in \phi_{dL}} g_{dij} V_{dj,t} = 0 \quad i \in \phi_b \quad (16)$$

式中： $g_{dij}$  为直流网络节点电导矩阵的第  $i$  行第  $j$  列元素。

直流系统的控制约束如下：

$$V_{d\min,t} \leq V_{di,t} \leq V_{d\max,t} \quad (17)$$

$$I_{d\min,t} \leq I_{di,t} \leq I_{d\max,t} \quad (18)$$

$$P_{d\min,t} \leq P_{di,t} \leq P_{d\max,t} \quad (19)$$

$$\cos \alpha_{d\min,t} \leq \cos \alpha_{di,t} \leq \cos \alpha_{d\max,t} \quad (20)$$

$$k_{d\min,t} < k_{di,t} < k_{d\max,t} \quad (21)$$

换流变压器的动作次数约束如下：

$$\sum_{t=0}^{23} |T_{i,t+1} - T_{i,t}| \leq K_i \quad i \in \phi_b \quad (22)$$

$$\sum_{t=0}^{23} |T_{i,t+1} - T_{i,t}| \leq k_i \quad i \in \phi_b \quad (23)$$

式中： $T_{i,t}$  为换流变压器  $i$  的分接头在第  $t$  时段的挡位值； $K_i$  为分接头的日最大允许动作次数； $k_i$  为分接头相邻挡位约束。

上述模型中，若不考虑直流变量及相关约束，则由目标函数和交流系统运行约束可构成交流系统的动态无功优化模型，具体见文献[5]。相对交流模型，本文模型引入了直流输电系统，相应增加了直流控制变量及交直流系统的关联约束和直流系统的运行约束。

在直流系统的运行约束中，将直流系统的控制约束用换流站的 5 个控制变量的上下限约束来表示，如式(17)~式(21)所示。本文认为，上下限约束一方面可以给直流控制变量以最大的调节空间，从而可以最大限度地发挥直流系统对功率与电压的调节能力；另一方面还可以兼顾换流站的所有常规控制方式。因为允许调节所有的直流控制变量，并通过动态无功优化计算来确定各控制变量在各时段的最优值，就可以将优化结果作为任意控制方式整定值调整的最优方案，从而可最大限度地实现降损目标。另外，本文还考虑了换流变压器变比的动态调节约束(式(22)、式(23))，这与交流电网的有载调压

变压器一样。通过这个约束可以避免变压器挡位的频繁调节以及相邻时段调节挡位数过多的问题。

## 2 混合智能算法

本文在文献[5]的混合算法的基础上,提出了交直流系统的动态无功优化混合算法。本文算法也包括整体优化、离散控制变量优化和连续控制变量优化3个子问题。与文献[5]的主要区别是引入了直流输电系统,相应需要明确上述3个子优化问题的直流变量及其约束方程,以及明确遗传个体适合度计算时潮流中的直流控制变量。其中,直流系统的变比也考虑为离散控制变量,其余为连续优化变量。而在计算交直流潮流<sup>[9-10]</sup>时,直流系统的给定量为换流变压器的变比和控制角,其余为状态变量。算法的主体思想同文献[5]。

## 3 算例仿真

为了验证本文模型和算法的有效性,采用了PSASP 36节点系统来进行动态无功优化仿真计算。该系统包含一条双极运行的直流输电线路。PSASP软件提供了直流系统的所有控制参数,但未提供无功电源的容量配置及负荷全天变化曲线。为此,本文修改并增加了节点的并联电容器/电抗器组以及节点的日负荷率曲线,见附录A表A1和图A2。另外,还增加了交直流系统其他优化变量的控制约束信息,见附录A表A2。

仿真计算时,系统平台CPU为Intel Core2 Duo E4300,内存1GB,软件环境为MATLAB 7.0。

### 3.1 降损效益和算法效果分析

表1的数据是10次随机计算的优化计算结果。从中可以看出,动态无功优化的降损效果很明显,优化前的电能损耗率为2.72%,而优化后平均网损率为2.53%,降损率达到了0.19%。算法收敛性稳定,10次结果中网损最大值和最小值相差甚微,而且平均优化结果与24时段分别优化的整体优化解非常接近,说明算法寻优能力强。

表1 10次仿真计算结果  
Table 1 Ten times simulation results

初始网损	初始损耗率/(%)	整体优化网损	10次优化网损平均值	
11.05	2.72	10.51	10.55	
10次优化平均网损率/(%)	网损最大值	网损最小值	平均计算时间/s	10次平均交替次数
2.53	10.61	10.53	851.83	23

附录A图A3给出了本文混合优化算法交替迭代过程中的适应度变化曲线。从中可以看到,混合算法只需要经过少数几次迭代就可以获得次优可行

解,而收敛迭代次数也不多,说明本文混合算法具有很强的寻优能力,可行解搜索效率高,具有很好的工程应用价值。

### 3.2 控制变量结果分析

附录A表A3、表A4给出了算例系统24个时段的交直流并联线路的最优分配功率和系统控制变量的优化策略。从表A3可见,不同时段,交直流断面传输的总有功功率不同,交直流并联线路分配的功率也不同,说明当交直流断面传输有功功率改变时,为了达到网损最小的目标,应调节直流线路的传输功率,而不能采用定功率控制方式维持直流功率不变。从表A4可见,相对交流系统中的补偿无功和变压器,换流站的调压设备调节更频繁,而控制角几乎每个时段都在变化。这说明直流输电系统为了满足传输功率变化的要求,需要频繁协调控制换流站的调压设备,才能使系统运行在最优状态。

### 3.3 交、直流并联线路功率协调分析

为了分析交直流并联线路潮流分配对网损的影响,本文采用整流侧定功率控制方式,在算例系统负荷不变的条件下,直接改变直流线路的控制功率,以此仿真系统的网损变化。为此,采用了整流侧定功率控制的修正动态无功优化模型及其修正混合算法。模型的修正是指整流侧直流功率为给定的常数,相应修改其关联的约束方程。算法的修正是指交直流潮流计算时,整流侧的给定量为变比和直流功率,原来的控制角改为状态变量。仿真结果见图1。其中, $x$ 的含义如下:假设基本模型和算法得到的最优值为基准值1,则修正模型中整流侧各时段的给定直流功率为其基准值的 $x$ 倍, $x$ 介于0.7~1.3。由图1可知,在交直流混合输电系统中,若交直流并联线路断面传输有功功率基本一定,则直流线路的传输功率有一个使全网有功损耗最低的最优值。无论实际传输功率大于或小于该最优值,都会导致系统的有功网损增加。而通过本文的直流变量完全可控的动态无功优化模型和算法,可以确定直流线路的最优传输功率,从而为实际交直流系统的电压无功优化控制提供科学的决策支持。

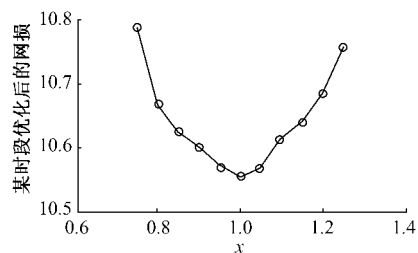


图1 直流传输功率对网损影响分析  
Fig.1 Analysis of influence of  $P_d$

## 4 结语

本文充分考虑直流输电系统对功率与电压的调节能力,建立了交直流系统的动态无功优化新模型。

以 PSASP 36 节点系统为例,验证了本文模型和算法的有效性,同时也说明了通过利用直流系统功率调节能力,可以进一步提高交直流系统动态无功优化的降损效益。通过算例分析,说明了直流输电系统为了实现降损目标,需要换流站的调压设备和控制设备协调动作。本文的模型和算法为交直流系统的动态无功优化控制提供了一个有效的工具。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 林俊昌,莫文雄.天广直流输电系统对广东电网的影响.广东电力,2003,16(1):10-13.  
LIN Junchang, MO Wenxiong. Influence of TianGuang DC transmission system on Guangdong power network. Guangdong Electric Power, 2003, 16(1): 10-13.
- [2] 胡泽春,王锡凡.配电网无功优化的分时段控制策略.电力系统自动化,2002,26(6):45-49.  
HU Zechun, WANG Xifan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 45-49.
- [3] 王秀丽,李正文,胡泽春.高压配电网无功/电压的日分段综合优化控制.电力系统自动化,2006,30(7):5-9.  
WANG Xiuli, LI Zhengwen, HU Zechun. Time-interval based comprehensive control strategy for daily voltage/VAR optimization in distribution systems. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 5-9.
- [4] YAN Wei, YU Juan, YU D C, et al. A new optimal reactive power flow model in rectangular form and its solution by predictor corrector primal dual interior point method. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 61-67.
- [5] 颜伟,田甜,张海兵,等.考虑相邻时段投切次数约束的动态无功优化启发式策略.电力系统自动化,2008,32(10):71-75.  
YAN Wei, TIAN Tian, ZHANG Haibing, et al. Heuristic strategy for dynamic reactive power optimization incorporating action time constraints between adjacent time intervals. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 71-75.
- [6] 赵登福,吉亚平,沈赞垠,等.交直流电力系统无功综合优化补偿研究.西安交通大学学报,1996,30(11):45-50.  
ZHAO Dengfu, JI Yaping, SHEN Zanzun, et al. Unified optimization of reactive power compensation in AC/DC power systems. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(11): 45-50.
- [7] 彭磊,吴耀武,熊信银,等.交直流混合输电系统的无功优化.继电器,2006,34(4):35-39.  
PENG Lei, WU Yaowu, XIOHG Xinyin, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/HVDC power system. Relay, 2006, 34(4): 35-39.
- [8] YU Juan, YAN Wei, LI Wenyuan. Quadratic models of AC-DC power flow and optimal reactive power flow with HVDC controls. Electric Power Systems Research, 2008, 78(3): 302-310.
- [9] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌,等.多种控制方式下交直流系统潮流算法改进.电力系统自动化,2005,29(21):25-31.  
LIU Chongru, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Advanced AC-DC power flow algorithm considering various controls. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 25-31.
- [10] EF-MARSAFAWY M M, MATHUR R M. A new, fast technique for load-flow solution of integrated multi-terminal DC/AC systems. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 246-255.

颜伟(1968—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行与控制。E-mail:cqyanwei@21cn.com

张海兵(1983—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行与控制。

田甜(1981—),女,硕士,主要研究方向:变电站设计。

## Dynamic Reactive Power Optimization of AC/DC System

YAN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Haibing<sup>1</sup>, TIAN Tian<sup>2</sup>, WANG Shengjiang<sup>3</sup>, CHENG Bin<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Electric Power Design Institute, Chongqing 400030, China; 3. Dispatching Center of Yunnan Power Grid, Kunming 650011, China; 4. 77206 Troop, Kunming 650011, China)

**Abstract:** Considering the regulating capacity of DC power transmission system to power and voltage, a new model of dynamic reactive power optimization of AC/DC system is proposed. The objective of the model is to minimize all-day network loss of the AC/DC system. Various constraints are taken into account, including power-flow constraints, DC variables constraints in control equations, dynamic constraints of discrete control variables, and security constraints of voltages. It is a multi-period nonlinear mixed integer program problem. Based on the hybrid algorithm, a hybrid intelligent algorithm for dynamic reactive power optimization of AC/DC system is proposed. Test results of modified PSASP 36-bus system demonstrate the efficiency of the proposed model and algorithm, and show that dynamic reactive power optimization has potential in the loss reduction of an AC/DC power transmission grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577073).

**Key words:** dynamic reactive power optimization; AC/DC power transmission system; hybrid intelligent algorithm; power coordination