

# 考虑直流电压交互影响的交直流混联系统无功规划

杨 堤<sup>1</sup>,程浩忠<sup>1</sup>,马则良<sup>2</sup>,姚良忠<sup>3</sup>,朱忠烈<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 华东电网有限公司,上海 200120;3. 中国电力科学研究院,北京 100192)

**摘要:**多馈入直流将对交直流混联系统的安全稳定运行产生重大影响。提出适用于交直流混联系统中直流输电间的系统和平均电压交互影响因子的定量计算方法;提出一种考虑直流输电间电压交互影响的交直流混联系统无功规划方法,上层规划以降低直流系统间电压交互影响为目标,下层规划以降低网损和无功投资成本最小为目标。IEEE 39 节点扩展系统的无功规划仿真和分析表明,所提方法对交直流混联系统的电压稳定性具有良好的改善作用。

**关键词:**电压稳定;电压交互影响;交直流混联系统;无功规划;双层规划

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.014

## 0 引言

自 1954 年瑞典哥特兰岛的直流输电工程建成投运,直流输电技术在国内外的研究和应用发展迅速<sup>[1-2]</sup>。我国负荷中心主要位于华东、华北和华南等地方,通过直流输电可以使西电东送,有效提高了资源配置能力。直流输电在我国已具有一定规模,由于受端地区多馈入直流的落点较为密集,直流输电无功消耗约为传输功率的 40%~60%,给区域电压稳定带来了较大挑战<sup>[3-4]</sup>。2011 年 8 月 7 日,台风影响使得华东宜华、葛南以及林枫等直流发生数次换相失败,导致三峡区域电压及有功出现较大波动<sup>[5]</sup>。2013 年 8 月 19 日,由于受到交流系统的扰动影响,林枫直流发生了双极闭锁故障并致使功率损失 1720 MW<sup>[6]</sup>。故研究交直流混联系统的无功规划方法对提高我国电网电压稳定性极有意义<sup>[7]</sup>。

在多馈入直流电压稳定性评估方面,文献[8]提出了模态电压灵敏因子、多馈入直流电压交互影响因子、直流功率/电流灵敏因子等指标。基于直流电压稳定评估指标,能有效反映多馈入直流输电稳定情况。

对送端区域或受端区域,通过优化直流控制参数、安装电容器电抗器或动态无功补偿装置等措施可以提高电网的电压稳定性。在整流站的无功优化方面,文献[9]对整流站的无功非线性轨迹特性进行了分析,通过优化直流控制参数减小了故障对跨区域电网的影响。针对西北某地区送端系统电压稳定水平较低的问题,文献[10]从电压稳定性、电网输电能力

以及经济性等方面提出了无功装置选点选型及优化配置措施。文献[11]建立了多目标无功优化方法,旨在减小交直流系统网损以及电压偏差。在动态无功的补偿方面,文献[12]研究了动态无功装置、换流器无功控制及直流无功的调制方法等对上海电网直流规划的影响,并有效改善了电网阻尼特性及电压稳定性。文献[13]将直流作为动态无功源,提出了受端地区直流系统的紧急控制策略。文献[14]考虑了直流的功率及电压调节能力,建立了交直流混联系统的动态无功优化模型,提出了以网损最小化的动态无功优化方法。文献[15-17]研究了考虑暂态电压稳定性约束的交直流系统无功优化方法,文献[18]提出了考虑静态和暂态电压稳定性的无功规划方法。但这些方法较为复杂,故有必要提出简易且考虑多馈入直流间电压相互影响的无功规划方法,以满足未来受端电网的无功需求。

此外,在无功规划的求解中,诸如改进小生境遗传算法<sup>[19]</sup>、多目标进化算法 MOEAs (Multi-Objective Evolutionary Algorithms)<sup>[20]</sup>、基于帕累托最优的多目标优化算法<sup>[21]</sup>等智能算法得到了较广泛的应用。

当前对无功规划的研究中,主要从提高电网电压稳定裕度、提高无功备用、减小电压偏差等方面提高系统电压稳定性。但多馈入直流输电的发展势必影响交直流混联系统的电压稳定性,而目前的研究中尚无考虑多馈入直流输电间电压交互影响的无功规划方法。本文的创新点主要为:

**a.** 提出了多馈入直流输电接入地区的系统电压交互影响影子及平均电压交互影响因子的计算方法;

**b.** 基于双层规划法建立了考虑多馈入直流输电间电压交互影响的无功规划模型,旨在减小直流

收稿日期:2016-10-30;修回日期:2017-02-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB-23903);国家自然科学基金资助项目(51261130473)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB23903) and the National Natural Science Foundation of China(51261130473)

输电间的电压交互影响。

### 1 直流系统电压交互影响因子量化指标

交直流混联系统电压稳定评估方法需考虑直流系统的运行模式和连接方式,直流系统典型结构如图 1 所示。

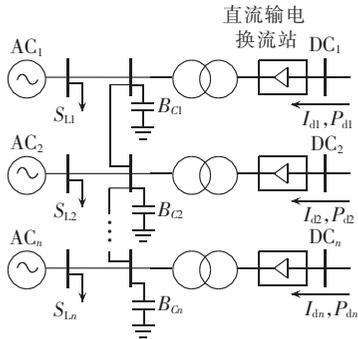


图 1 多馈入直流输电系统结构

Fig.1 Structure of multi-infeed HVDC system

多馈入直流输电的接入使得传统电网形成了交直流混联系统,交直流系统的潮流平衡等式有:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{dc} \\ \Delta P_{ac} \\ \Delta Q_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P_{dc}I_{dc}} & J_{P_{dc}\theta} & J_{P_{dc}U} \\ J_{P_{ac}I_{dc}} & J_{P_{ac}\theta} & J_{P_{ac}U} \\ J_{Q_{ac}I_{dc}} & J_{Q_{ac}\theta} & J_{Q_{ac}U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{dc} \\ \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\Delta P_{dc}$ 、 $\Delta P_{ac}$ 、 $\Delta Q_{ac}$  分别为直流有功增量、交流电网有功增量及无功增量;  $\Delta \theta$ 、 $\Delta U$  分别为交流电网节点电压相角及幅值增量;  $\Delta I_{dc}$  为直流电流增量;  $J_{P_{dc}I_{dc}}$ 、 $J_{P_{ac}I_{dc}}$ 、 $J_{Q_{ac}I_{dc}}$ 、 $J_{P_{dc}\theta}$ 、 $J_{P_{ac}\theta}$ 、 $J_{Q_{ac}\theta}$ 、 $J_{P_{dc}U}$ 、 $J_{P_{ac}U}$ 、 $J_{Q_{ac}U}$  分别为直流有功、交流有功、交流无功及直流电流、电压相角、电压幅值间的灵敏度元素。

不考虑有功扰动,上式可推导得到:

$$\Delta Q = J_R \Delta U \quad (2)$$

其中,  $J_R$  为雅可比矩阵。可推导得到:

$$J_R = J_{Q_{ac}U} - J_{Q_{ac}\theta} J_{P_{ac}\theta}^{-1} J_{P_{ac}U} \quad (3)$$

将式(2)转化为:

$$J_R^{-1} \Delta Q = \Delta U \quad (4)$$

令  $\Delta Q_i \neq 0$  且  $\Delta Q_j = 0 (j \neq i)$ , 即:

$$J_R^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据潮流平衡方程的雅可比矩阵可推导得到直流电压交互影响因子 MIIF (Multi-Infeed Interaction Factor) 的解析计算方法。

MIIF 可定义为:

$$MIIF_{ji} = \left. \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \right|_{\Delta Q_i=0, i \neq j} \quad (6)$$

其中,  $\Delta U_i$ 、 $\Delta U_j$  分别为第  $i$  和  $j$  个直流输电换流母线

的电压变化量。若 MIIF 较大,则受端地区某条直流输电线路发生大扰动后势必会对另外一条直流输电线路有较大的影响,而直流输电的大幅波动势必会影响交流系统电压稳定性。

MIIF 的经验求解方法为取第  $i$  个直流输电换流母线上无功扰动  $\Delta Q_i$  造成电压波动 1% 后,第  $j$  个直流输电换流母线的相对电压变化量。该方法只能定性计算 MIIF,具有一定的局限性。

因此,可基于雅可比矩阵推导 MIIF 的解析计算式,由式(6)可得到:

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j / \Delta Q_i}{\Delta U_i / \Delta Q_i} = \frac{(J_R^{-1})_{ji}}{(J_R^{-1})_{ii}} \quad (7)$$

直流间电压交互影响指标  $MIIF_{ji}$  只能描述直流输电接入后任意 2 条换流母线间的相互影响。因此,可定义系统电压交互影响因子为:

$$MIIF_s = \max \{ MIIF_{ji} \} \quad (8)$$

同理,可定义平均电压交互影响因子为:

$$MIIF_a = \frac{1}{(n_c - 1)^2} \sum_{i,j \in N_c, i \neq j} MIIF_{ji} \quad (9)$$

其中,  $n_c$  为直流换流器个数;  $N_c$  为直流输电换流母线集合。

为了分析补偿节点对 MIIF 的影响,可定义电压交互影响因子灵敏度为:

$$S_{MIIF} = \frac{\Delta MIIF}{\Delta Q_c} \quad (10)$$

其中,  $\Delta Q_c$  为无功补偿增量。

MIIF 不仅与交流系统负荷、系统等值阻抗及耦合阻抗、直流系统等因素相关,而且与无功补偿容量密切相关<sup>[22]</sup>。MIIF 指标能够反映换流器交流侧母线之间的相互作用强弱,且有  $0 \leq MIIF_{ji} \leq 1$ 。若  $MIIF_{ji}$  为 1,则表示 2 个换流器接入同一条母线,电气距离也为 0。 $MIIF_{ji}$  越大,则换流母线之间的电气距离越小,换流母线之间的相互影响就越大; $MIIF_{ji}$  越小,则换流母线之间的电气距离越大,换流母线之间的相互影响就越小。

文献[23]研究结果表明 MIIF 与多馈入短路比 MISCR (Multi-Infeed Short Circuit Ratio) 成反比关系,即 MIIF 越小, MISCR 越大。其中, MISCR 常用于衡量受端地区的交流系统强度情况,短路比越大则表明多馈入直流输电接入地区的交流系统强度越高,越不易引起电压失稳事故<sup>[23]</sup>。文献[24]的研究结论表明,受端地区 MIIF 指标越大,则当第  $i$  条直流输电逆变侧的换流母线发生故障时,第  $i$  个和第  $j$  个逆变侧同时发生换相失败的可能性则越高。当逆变侧持续发生换相失败时,则会导致换流母线的电压降低,进而可能引起交流系统电压失稳事故的发生。因此,MIIF 越小则越有利于受端地区的电压稳定性。

## 2 基于双层规划法的交直流混联系统无功规划方法

为增强送端或受端地区的电压稳定性,建立了基于双层规划法的交直流混联系统无功规划模型。

### 2.1 上层规划

上层规划通过优化换流器控制参数及无功补偿容量等变量减小多直流系统间的相互耦合影响。

目前还没有公认的 MIF 评估阈值,将 MIF 作为无功规划的约束条件尚有难度,因此,本文选取将 MIF 指标作为无功规划的优化目标进行建模。

#### 2.1.1 目标函数

上层规划的优化目标为对  $MIF_a$  的最小化。上层规划的优化目标为:

$$\min f_1(\mathbf{x}) = MIF_a \quad (11)$$

其中,变量  $\mathbf{x}$  包括控制变量和状态变量。

上层规划的控制变量为:

$$C_1 = \{Q_c; Q_r; \gamma\} \quad (12)$$

其中,  $Q_c$  和  $Q_r$  分别为电容器和电抗器规划容量;  $\gamma$  为换流器熄弧角。

上层规划的状态变量为:

$$X_s = [U_{dc}; P_{dc}; I_{dc}; \mu] \quad (13)$$

其中,  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$ 、 $P_{dc}$  分别为直流电压、直流电流和直流功率;  $\mu$  为换相角。

#### 2.1.2 约束条件

上层规划的约束条件主要有等式约束及不等式约束,等式约束主要有直流输电电压电流、有功以及无功等关系。不等式约束条件主要包含直流电压、换流器控制角、电容器或电抗器容量等。

##### a. 等式约束。

直流输电电压电流以及有功无功有如下关系:

$$U_{dc,i} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} m k_t U_{pcc,i} \cos \alpha_i - \frac{3}{\pi} m X_{ci} I_{dc,i} \quad i \in R_{rec} \cup R_{inv} \quad (14)$$

$$P_{dc,i} = U_{dc,i} I_{dc,i} \quad (15)$$

$$I_{dc,i} = \frac{U_{dc,rec} - U_{dc,inv}}{R_{dc}} \quad (16)$$

$$\tan \varphi_i = \frac{2\mu_i + \sin 2\alpha_i - \sin 2(\alpha_i + \mu_i)}{\cos 2\alpha_i - \cos 2(\alpha_i + \mu_i)} \quad (17)$$

其中,  $U_{dc,i}$ 、 $I_{dc,i}$  分别为第  $i$  个直流输电直流电压和直流电流;  $U_{pcc,i}$  为换流母线电压;  $k_t$  为换流变的变比;  $m$  为换流器桥数;  $P_{dc,i}$  为直流有功功率;  $\alpha_i$  为换流器的触发角;  $R_{dc}$  为直流线路电阻;  $X_{ci}$  为换流电抗;  $R_{rec}$ 、 $R_{inv}$  分别为整流侧和逆变侧节点集合。

##### b. 不等式约束。

直流电压需要满足:

$$U_{dc,i,min} \leq U_{dc,i} \leq U_{dc,i,max} \quad (18)$$

电容器补偿容量需满足:

$$Q_{dc,i,min} \leq Q_{dc,i} \leq Q_{dc,i,max} \quad (19)$$

换流器触发角、熄弧角需满足:

$$\alpha_{i,min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{i,max} \quad i \in R_{rec} \quad (20)$$

$$\gamma_{i,min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{i,max} \quad i \in R_{inv} \quad (21)$$

其中,  $U_{dc,i,max}$ 、 $U_{dc,i,min}$  分别为直流电压上、下限;  $Q_{dc,i,max}$ 、 $Q_{dc,i,min}$  分别为无功补偿容量上、下限;  $\alpha_{i,max}$ 、 $\alpha_{i,min}$ 、 $\gamma_{i,max}$ 、 $\gamma_{i,min}$  分别为直流触发角和熄弧角上、下限。

### 2.2 下层规划

无功规划不仅需要提高受端地区的安全稳定性,而且需要考虑到无功投资成本。下层规划旨在减小网损成本和无功设备投资成本,以提高交直流混联系统的电压稳定性和经济性。

#### 2.2.1 目标函数

下层规划的优化目标为:

$$\min f_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{T_1} \left( \sum_{i=1}^p C_{c,i} Q_{c,i} + \sum_{j=1}^q C_{r,j} Q_{r,j} \right) + C_e \zeta P_{loss} \quad (22)$$

其中,  $C_e$  为电价;  $C_{c,i}$ 、 $C_{r,j}$  分别为电容器、电抗器单价;  $P_{loss}$  为网损;  $\zeta$  为年最大负荷小时数;  $T_1$  为无功设备寿命;  $p$ 、 $q$  分别为电容器、电抗器安装节点个数。

下层规划的控制变量为:

$$C_2 = \{U_G\} \quad (23)$$

其中,  $U_G$  为发电机机端电压。

交流侧状态变量为:

$$X_{ac} = [U_{ac}; \theta; Q_G] \quad (24)$$

其中,  $U_{ac}$ 、 $\theta$  分别为交流侧的电压幅值及相角;  $Q_G$  为发电机的输出无功。

直流侧状态变量为:

$$X_{dc} = [U_{dc}; P_{dc}; I_{dc}; \mu] \quad (25)$$

#### 2.2.2 约束条件

##### a. 交流系统约束条件。

交直流混联系统潮流平衡方程需满足:

$$P_{G,i} + P_{dc,i} - P_{D,i} = U_i \sum_{j=1}^{N_b} [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] U_j \quad (26)$$

$$Q_{G,i} + Q_{dc,i} - Q_{D,i} = U_i \sum_{j=1}^{N_b} [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] U_j \quad (27)$$

其中,  $P_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}$  分别为发电机有功及无功;  $P_{dc,i}$ 、 $Q_{dc,i}$  分别为直流有功及无功;  $P_{D,i}$ 、 $Q_{D,i}$  分别为负荷有功及无功;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为电导及电纳;  $N_b$  为节点个数。

发电机无功需满足:

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \quad (28)$$

其中,  $Q_{Gi,max}$ 、 $Q_{Gi,min}$  分别为发电机的无功输出上、下限。

交流系统节点电压需满足:

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (29)$$

其中,  $U_{i,max}$ 、 $U_{i,min}$  分别为交流节点电压上、下限。

**b. 直流系统约束条件。**

直流输电电压、电流以及有功、无功需要满足式(14)—(17)的等式约束,并需满足式(18)—(21)的不等式约束。

**2.3 交直流混联系统无功规划策略**

交直流混联系统的无功规划可基于双层规划法求解。换流母线对直流系统的影响较大,因此,换流母线可以作为无功规划选址的待选点之一。为充分利用电网其他节点对 MIIF 的影响,可基于式(10)的灵敏度计算并选择较灵敏的补偿节点也作为无功规划选址待选点。

本文的无功规划采用改进差分进化 DE(Differential Evolution)算法<sup>[25]</sup>进行优化计算,首先对上层规划进行优化计算,以减小多馈入直流输电的交互电压影响,将优化得到的直流控制参数及无功补偿容量等最优决策变量用于下层规划中,下层规划以网损最小化和无功投资成本最小化为目标。下层规划得到的发电机机端电压优化量代入上层规划中并继续迭代寻优,直到达到优化最大迭代次数,最终得到最佳的无功规划方案。

**3 算例分析**

为了对考虑直流电压交互影响的交直流混联系统的无功规划方法进行分析,本文基于 IEEE 39 节点标准算例引入 3 条直流输电,整流侧由节点 2、10 和 22 接入,逆变侧由节点 8、17 和 26 接入,IEEE 39 节点扩展系统如图 2 所示。其中,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制,初始直流电流均为 1.0 p.u.,熄弧角均为 8.0°。

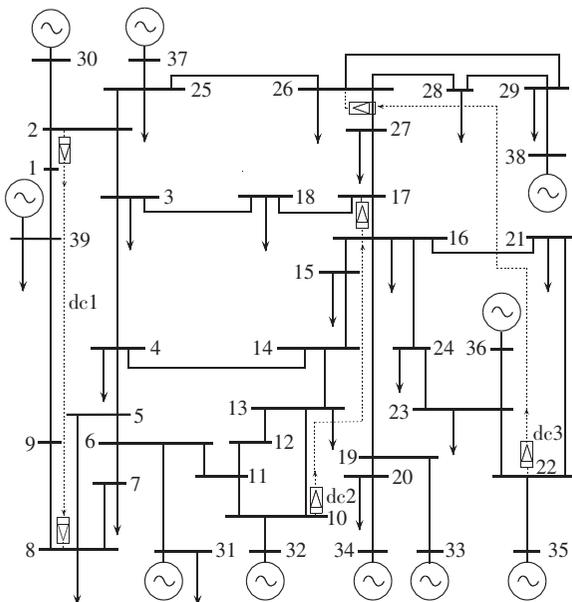


图 2 IEEE 39 节点扩展系统  
Fig.2 IEEE 39-bus extended system

由于换流母线对直流输电的稳定有重要的作用,对直流电压交互影响的改善较为灵敏,故将换流母线均作为无功补偿的待选点,此外,可通过式(10)的灵敏度计算筛选出对直流电压交互影响作用较大的其他节点,用以改善系统的无功分布。本算例中灵敏度最大的 5 个节点如表 1 所示。因此,本算例的无功规划待补偿点有换流母线节点 2、10、22、8、17、26 及节点 3、6、18、25。

表 1 直流输电系统间电压交互影响灵敏度  
Table 1 Nodes with bigger voltage interaction sensitivity

| 节点 | 补偿灵敏度  | 节点 | 补偿灵敏度  |
|----|--------|----|--------|
| 3  | 0.0032 | 25 | 0.0027 |
| 6  | 0.0021 | 27 | 0.0008 |
| 18 | 0.0014 |    |        |

交直流混联系统的上层规划以减小 MIIF<sub>a</sub> 为目标,下层规划以网损成本和无功投资成本最小化为目标。优化算法采用改进 DE 算法,优化迭代次数设为 300 次,种群个数设为 45,交叉概率设为 0.8,选择概率设为 0.8,变异概率设为 0.08,变异权重系数  $\omega$  上、下限分别取为 0.8 和 0.2。

在无功规划约束中,电压上、下限分别取为 1.1 p.u. 和 0.9 p.u.,触发角  $\alpha$  上、下限分别取为 30° 和 5°,熄弧角  $\gamma$  上、下限分别取为 25° 和 7°。无功补偿容量上、下限分别为 3 p.u. 和 -3 p.u.,无功装置的寿命  $T_l$  设为 10 a,电容器、电抗器的设备单价  $C_{c,i}$  和  $C_{r,j}$  设为 2.546 万元/Mvar,电价  $C_e$  设为 0.617 元/(kW·h),年最大负荷小时数  $\zeta$  设为 3600 h。

无功优化前、后的 MIIF 分别如表 2 及表 3 所示,表中 Rec 表示整流侧,Inv 表示逆变侧。优化前、后最

表 2 优化前的 MIIF

Table 2 Voltage interaction factor MIIF between HVDCs before optimization

| 换流站              | MIIF             |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | Rec <sub>1</sub> | Inv <sub>1</sub> | Rec <sub>2</sub> | Inv <sub>2</sub> | Rec <sub>3</sub> | Inv <sub>3</sub> |
| Rec <sub>1</sub> | 1.0000           | 0.1028           | 0.0942           | 0.2149           | 0.0503           | 0.2445           |
| Inv <sub>1</sub> | 0.0674           | 1.0000           | 0.2954           | 0.1103           | 0.0376           | 0.0630           |
| Rec <sub>2</sub> | 0.0798           | 0.3814           | 1.0000           | 0.1478           | 0.0549           | 0.0818           |
| Inv <sub>2</sub> | 0.1681           | 0.1306           | 0.1355           | 1.0000           | 0.1532           | 0.3427           |
| Rec <sub>3</sub> | 0.0493           | 0.0558           | 0.0629           | 0.1918           | 1.0000           | 0.0928           |
| Inv <sub>3</sub> | 0.1490           | 0.0579           | 0.0581           | 0.2643           | 0.0573           | 1.0000           |

表 3 优化后的 MIIF

Table 3 Voltage interaction factor MIIF between HVDCs after optimization

| 换流站              | MIIF             |                  |                  |                  |                  |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                  | Rec <sub>1</sub> | Inv <sub>1</sub> | Rec <sub>2</sub> | Inv <sub>2</sub> | Rec <sub>3</sub> | Inv <sub>3</sub> |
| Rec <sub>1</sub> | 1.0000           | 0.0919           | 0.0862           | 0.1968           | 0.0479           | 0.2254           |
| Inv <sub>1</sub> | 0.0636           | 1.0000           | 0.2579           | 0.1208           | 0.0363           | 0.0535           |
| Rec <sub>2</sub> | 0.0719           | 0.3486           | 1.0000           | 0.1331           | 0.0521           | 0.0727           |
| Inv <sub>2</sub> | 0.1436           | 0.1199           | 0.1229           | 1.0000           | 0.1475           | 0.3146           |
| Rec <sub>3</sub> | 0.0421           | 0.0516           | 0.0493           | 0.1743           | 1.0000           | 0.0868           |
| Inv <sub>3</sub> | 0.1372           | 0.0534           | 0.0572           | 0.2516           | 0.0543           | 1.0000           |

大电压交互影响因子分别为 0.3814、0.3486, 故该算例最大电压交互影响因子受到  $Rec_2$  (节点 10) 和  $Inv_1$  (节点 8) 间的交互电压影响。此外,  $Inv_2$  (节点 17) 及  $Inv_3$  (节点 26) 间电压交互影响也较高。

优化后的直流输电运行状态如表 4 所示, 优化后无功补偿规划容量如表 5 所示。其中, 补偿量为标么值, 无功容量的基准值为 100 Mvar。无功补偿中除节点 6 为感性补偿外, 其他为容性补偿。

表 4 优化后直流输电系统运行状态

Table 4 Operating conditions of multi-infeed HVDC system after optimization

| 换流站 |         | 触发角<br>(熄弧角)/( $^{\circ}$ ) |         | 电压/kV |       | 功率/kW |       |
|-----|---------|-----------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
|     |         | 优化前                         | 优化后     | 优化前   | 优化后   | 优化前   | 优化后   |
|     |         | 整流侧                         | $Rec_1$ | 13.6  | 13.2  | 480.6 | 485.1 |
|     | $Rec_2$ | 12.2                        | 11.8    | 491.1 | 493.2 | 96.2  | 96.6  |
|     | $Rec_3$ | 12.1                        | 12.7    | 501.4 | 498.4 | 98.9  | 97.7  |
| 逆变侧 | $Inv_1$ | 8.0                         | 7.4     | 479.8 | 484.7 | 94.1  | 94.9  |
|     | $Inv_2$ | 8.0                         | 7.9     | 490.2 | 492.8 | 95.6  | 96.6  |
|     | $Inv_3$ | 8.0                         | 8.6     | 500.7 | 498.0 | 98.3  | 97.6  |

表 5 无功规划容量

Table 5 Planned reactive-power capacity

| 节点 | 补偿量   | 节点 | 补偿量  |
|----|-------|----|------|
| 2  | 0.47  | 3  | 1.21 |
| 6  | -0.31 | 8  | 0.83 |
| 10 | 0.54  | 17 | 1.17 |
| 18 | 1.41  | 22 | 0.39 |
| 25 | 0.28  | 26 | 1.36 |

无功优化前后的 MIIF 和网损(标么值)如表 6 所示, 经过无功规划后, 年均无功投资成本为 202.9 万元, 平均电压交互影响因子降低了 7.1%, 系统电压交互影响因子降低了 8.6%。优化后年网损费用为 8869.3 万元, 比优化前降低了 6.9%。

表 6 优化前后的 MIIF 及网损

Table 6 MIIFs and power-loss, before and after optimization

| 场景       | MIIF <sub>0</sub> | MIIF <sub>a</sub> | 网损     | 无功规划容量/Mvar |
|----------|-------------------|-------------------|--------|-------------|
| 优化前      | 0.3814            | 0.1337            | 0.4289 | —           |
| 传统 DE 算法 | 0.3561            | 0.1286            | 0.4017 | 823         |
| 优化后 本文方法 | 0.3486            | 0.1242            | 0.3993 | 797         |
| 文献[26]方法 | 0.3712            | 0.1319            | 0.3925 | 759         |

为了与常用的无功规划方法比较, 本文将文献[26]中考虑静态电压稳定性的无功规划方法与本文方法进行对比分析, 比较结果如表 6 所示, 两者的网损和无功规划容量相差不多, 但前者 MIIF<sub>a</sub> 仅减小 2.7%, 故本文方法对直流电压交互影响的改善效果更加明显。因此, 考虑直流间交互影响的无功规划方法更能提高多条直流输电落入区域的电压稳定性。此外, 将本文采用的改进 DE 算法和传统 DE 算法<sup>[25]</sup>进行了比较, 由表 6 可知, 传统 DE 算法

得到的电压交互影响因子略高, 且得到的无功规划容量也略大, 因此, 采用改进 DE 算法较传统 DE 算法有更好的寻优能力。

因此, 本文提出的无功优化方法, 能以最低无功投资成本和运行成本有效降低直流间的电压交互影响。

## 4 结论

本文建立了考虑直流间电压交互影响的交直流混联系统无功规划方法, 利用 MIIF 指标的定量解析计算方法评估直流系统间的电压影响, 根据直流间电压交互影响的灵敏度可计算出有效的无功补偿点, 无功规划采用双层规划法, 能以最低的无功投资成本及运行成本降低直流间的电压交互影响, 满足了提高交直流混联系统对多条直流间稳定性和无功补偿经济性的要求, 本文提出的无功规划方法可为送端区域或受端区域的稳定运行提供一定的借鉴。

## 参考文献:

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.  
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.  
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [4] ALBERTO B, CRISTIAN B, SIMONE C, et al. Var planning assessment in a meshed AC/DC system: the future Irish transmission system[C]//2013 IREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control. Rethymno, Greece: IEEE, 2013: 1-8.
- [5] 李国栋, 皮俊波, 王震, 等. 三峡近区电网交直流系统故障案例分析[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 124-128.  
LI Guodong, PI Junbo, WANG Zhen, et al. Case analysis of AC-DC system faults in the near region grids of Three Gorges[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 124-128.
- [6] 李国栋, 皮俊波, 郑力, 等.  $\pm 500$  kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877-881.  
LI Guodong, PI Junbo, ZHENG Li, et al. Simulation analysis on case of bipolar blocking in  $\pm 500$  kV EHVDC power transmission line from Tuanlin to Fengjing[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 877-881.
- [7] TEMESGEN M, HAILESELASSIE K. Power system security in a meshed North Sea HVDC grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(4): 978-990.
- [8] DENIS L H A, GÖRAN A. Analysis of voltage and power inter-

- actions in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 816-825.
- [9] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.  
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [10] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [11] 李清, 刘明波, 杨柳青. 求解交直流互联电网多目标无功优化问题的 INNC 法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1150-1158.  
LI Qing, LIU Mingbo, YANG Liuqing. INNC method applied to multi-objective reactive power optimization in AC/DC interconnected power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1150-1158.
- [12] 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.
- [13] 郑超, 马世英, 盛灿辉, 等. 以直流逆变站为动态无功源的暂态电压稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6141-6149.  
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHENG Canhui, et al. Transient voltage stability control based on the HVDC inverter station acting as dynamic reactive source[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6141-6149.
- [14] 颜伟, 张海兵, 田甜, 等. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 43-46.  
YAN Wei, ZHANG Haibing, TIAN Tian, et al. Dynamic reactive power optimization of AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 43-46.
- [15] LGNACIO A C, PABLO L, EDGARDO D, et al. Advanced application of transient stability constrained-optimal power flow to a transmission system including an HVDC-LCC link[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2015, 9(13): 1765-1772.
- [16] RABIH A J, NELSON M, BIKASH C P, et al. Contingency constrained VAR planning using penalty successive conic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 545-553.
- [17] MAGESH P, AHMED S, VENKATARAMANA A, et al. Dynamic optimization based reactive power planning to mitigate slow voltage recovery and short term voltage instability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3865-3874.
- [18] LIU Haifeng, VENKAT K, JAMES D M, et al. Optimal planning of static and dynamic reactive power resources[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(12): 1916-1927.
- [19] 崔挺, 孙元章, 徐箭, 等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 43-50.  
CUI Ting, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Reactive power optimization of power system based on improved niche genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 43-50.
- [20] 李智欢, 段献忠. 多目标进化算法求解无功优化问题的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 57-65.  
LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Comparison and analysis of multiobjective evolutionary algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 57-65.
- [21] 李鸿鑫, 李银红, 陈金富. 自适应选择进化算法的多目标无功优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 71-79.  
LI Hongxin, LI Yinong, CHEN Jinfu. Multiple evolutionary algorithms with adaptive selection strategies for multi-objective optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 71-79.
- [22] 肖俊, 李兴源. 多馈入和多端交直流系统相互作用因子及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 1-7.  
XIAO Jun, LI Xingyuan. Analysis on multi-infeed interaction factor of multi-infeed AC/DC system and multi-terminal AC/DC system and its influencing factor[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 1-7.
- [23] 邵瑶, 汤涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 794-799.  
SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.
- [24] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-115.  
SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-115.
- [25] 康忠健, 瞿淑伟. 基于差分进化算法的油田区域配电网无功优化计算的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 226-231.  
KANG Zhongjian, ZI Shuwei. Research on the reactive power optimization of oil-field regional distribution network based on differential evolution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 226-231.
- [26] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25.  
LIU Mingbo, YANG Yong. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25.

#### 作者简介:



杨堤

杨堤(1983—),男,陕西汉中,博士,主要从事无功规划和直流输电技术的研究(E-mail: yang\_ti@163.com);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电压稳定与控制、电网规划和电能质量等(E-mail: hzcheng@sjtu.edu.cn)。

(下转第 108 页 continued on page 108)

coordinated excitation and STATCOM controller based on Hamiltonian structure for multimachine-power-system stability enhancement[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2003, 150(3):285-294.

#### 作者简介:

刘 青(1974—),女,河北石家庄人,副教授,博士,主



刘 青

要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全防御与恢复控制(E-mail:hddliliuqing781@163.com);

张立娜(1989—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为柔性交流输电与智能电网(E-mail:zlnncepu@163.com)。

## Nonlinear robust coordinated control of time-delay feedback excitation and STATCOM for multi-machine power system

LIU Qing, ZHANG Lina

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The power system with wide-area signals becomes a time-delay dynamic system due to the time-delay of wide-area feedback signals. Pade approximation is adopted to implicate the effect of time-delay section in the coefficients of system dynamic equations and a first-order differential equation is applied to express the dynamic characteristics of STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) as a controllable current source, based on which, the electromagnetic power expressions of multi-machine power system with multiple STATCOMs are derived. Based on the pseudo-generalized Hamilton theory, a multi-machine power system with STATCOM and time-delay feedback excitation is represented as a pseudo-generalized dissipation Hamilton system.  $L_2$  disturbance attenuation control method is used to design a coordinated control strategy of STATCOM and generator excitation, which considers the time-delay of wide-area signals and the transfer conductance. Results of the simulation for a four-machine two-area system show that, compared with traditional decentralized controller, the proposed nonlinear robust coordinated controller with the consideration of time-delay effect restrains the power system oscillation more effectively and is insensitive to time-delay to a certain degree.

**Key words:** electric power systems; excitation system; electric generators; STATCOM; dynamic models; pseudo-generalized Hamilton system; time delay; Pade approximation;  $L_2$  disturbance attenuation; coordinated control

(上接第 101 页 continued from page 101)

## Reactive power planning considering voltage interaction among HVDCs for hybrid AC-DC system

YANG Di<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, MA Zeliang<sup>2</sup>, YAO Liangzhong<sup>3</sup>, ZHU Zhonglie<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. East China Grid Company Limited, Shanghai 200120, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** As multi-infeed HVDC greatly influences the safe and stable operation of hybrid AC/DC system, a method is proposed to quantitatively calculate the system voltage interaction factor and average voltage interaction factor between HVDC systems in hybrid AC/DC system. Furthermore, a reactive-power planning method considering the voltage interaction among HVDC systems is proposed, which takes the minimum voltage interaction as the objective of its upper layer while the minimum power-loss and minimum investment as the objectives of its lower layer. Simulation and analysis for IEEE 39-bus extended system show that the proposed reactive-power planning method improves the voltage stability of hybrid AC/DC system.

**Key words:** voltage stability; voltage interaction; hybrid AC/DC system; reactive power planning; bi-level programming