

DOI: 10.7667/PSPC161950

考虑直流输电的电力系统无功备用优化

马雷鹏¹, 韦钢¹, 李沁愉², 张永超¹, 叶莘¹

(1. 上海电力学院, 上海 200082; 2. 上海市供电公司市南供电公司, 上海 200233)

摘要: 目前无功备用研究较少涉及包含直流输电线路的电力系统。提出一种针对交直流混联系统的电力系统无功备用优化模型。基于交直流混联潮流方程, 该模型首先利用发电机端电压及无功功率控制灵敏度定义直流输电系统的有效无功备用。以此为目标, 在考虑各种系统约束的情况下建立考虑交直流混联的电力系统无功备用优化模型。针对无功备用优化模型耦合两个运行状态而难以准确求解的缺陷, 提出一种解耦方法进行求解。对改进 IEEE 39 节点系统的算例分析结果表明, 所提无功备用定义可有效衡量系统的无功电压水平, 而所提模型可以有效提高含直流输电线路电力系统的无功备用和电压稳定裕度, 保障电力系统的安全稳定性。

关键词: 直流输电; 无功备用; 电压控制; 安全稳定

Optimal reactive power reserve dispatch method considering DC transmission lines

MA Leipeng¹, WEI Gang¹, LI Qinyu², ZHANG Yongchao¹, YE Shen¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China; 2. South City Power Supply Company, Shanghai Municipal Electric Power Corporation, Shanghai 200233, China)

Abstract: The reactive power reserve of AC-DC transmission networks is not yet within the focus of current research. An optimal reactive power reserve dispatch method is established for the AC-DC transmission network. At first, deduced from the AC-DC power flow equations of AC-DC networks, an effective reactive power reserve definition is proposed for the AC-DC transmission network by the generator control sensitivities of both voltage and reactive power. Based on which, an optimal reactive power reserve dispatch model is proposed under several operational constraints. To solve the above optimal power flow problem with two operational statuses, a decoupling solution is proposed. The simulation results on IEEE 39 bus system manifest that, the proposed definition of reactive power reserve is able to represent the voltage level of AC-DC networks, and the proposed model is able to enhance the security of power system via the increments of the reactive power reserve and voltage stability margin.

This work is supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: DC transmission; reactive power reserve; voltage control; security and stability

0 引言

无功备用是指系统为应对各种扰动可以发出的最大可用无功。根据时间尺度不同, 可分为静态无功备用^[1-3]和暂态无功备用^[4]。其中, 静态无功备用主要应对负荷增长, 因此一般认为是准静态问题^[5-10]; 而暂态无功备用涉及的扰动主要针对系统故障, 特别是线路故障。大量研究表明, 无论静态和暂态,

无功备用的多寡与系统的安全稳定性呈现强相关, 对其进行优化是保障电力系统安全稳定性的重要手段。

建立无功备用优化模型, 首先需要对电力系统的无功备用进行定义。对于单一无功源系统, 定义方法通常分为物理备用法^[1-3]和有效备用法^[11]。其中物理备用法将无功备用定义为无功源无功出力上限与当前出力之差。而在系统的静态失稳点, 无功源并非一定处于物理上限, 因此物理备用法会乐观地估计系统的无功备用水平。而有效备用法通常将无功备用定义为电压稳定临界点处无功源无功出力与

基金项目: 上海市绿色能源并网工程技术研究中心资助项目 (13DZ2251900)

当前出力之差,可以更准确估计无功源的无功备用。而对于多无功源系统,其定义更加复杂,通常采用权系数的方法区分各无功源的无功价值^[5-6]。

以上研究均基于普通交流电力系统,随着我国直流输电线路的大规模建设,特别是VSC-HVDC系统的日益成熟,交直流混联运行将在我国长期存在,目前学者们对考虑交直流混联系统的无功优化问题已经进行了较多研究。其中,文献[12]提出基于遗传算法和粒子群算法的交直流系统无功优化方法,但并未给出电压稳定性提高的原理;文献[13]针对典型日的运行状态变化,提出交直流混合系统的动态无功优化;文献[14]通过雅克比矩阵奇异值分解后得到的左特征向量和右特征向量判断系统的运行状态,但仍未涉及无功源对系统的支撑能力;文献[15]提出交直流系统交互影响因子,通过优化该影响因子,交直流混联系统的电压稳定性得到较大程度的提升。以上方法具有两个显著缺陷:第一,无法为系统电压稳定性提升提供机理性解释;第二,研究成果无法与目前无功电压分层分区平衡的控制策略兼容。目前,考虑交直流混联系统的无功备用优化研究仍较少,其主要问题包括,第一,交直流混联系统中无功备用的定义尚不明确;第二,在优化中,VSC-HVDC的控制策略可能反复切换,造成问题难以求解。

针对以上问题,本文提出一种考虑交直流混联系统的无功备用定义方法,一种VSC-HVDC的切换控制策略,并以此为基础提出考虑交直流混联系统的无功备用优化模型。算例分析的结果表明,本文方法可以有效提高交直流混联系统的电压稳定性。

1 含直流输电电力系统无功备用优化模型

1.1 VSC-HVDC 的电压控制策略

为保持VSC-HVDC控制灵活性,可保留一定的电压死区。当换流器功率达到功率极限或在电压死区控制范围时换流器切换为定功率控制。考虑电压死区控制的电压/功率关系如式(1)所示。

$$P_{dc} = \begin{cases} P_1 & V_{dc} \geq V_1, K=1 \\ P^* - k_H(V_{dc} - V^*) & V_H \leq V_{dc} < V_1, K=2 \\ P^* & V_L \leq V_{dc} < V_H, K=3 \\ P^* - k_L(V_{dc} - V^*) & V_2 \leq V_{dc} < V_L, K=4 \\ P_2 & V_{dc} < V_2, K=5 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P^* 和 V^* 分别为直流给定功率和电压; V_H 和 V_L 分别为死区电压的上限和下限; k_H 和 k_L 分别为电压功率线性控制区间控制斜率; K 为控制分区段。其模型如图1所示。

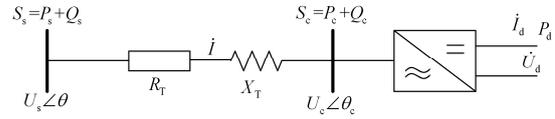


图1 VSC-HVDC 模型

Fig. 1 Model of VSC-HVDC

图中: P_s 和 Q_s 为交流配电网注入变压器的有功和无功功率; P_c 和 Q_c 为变压器直流注入直流变流器的有功功率和无功功率; P_d 为直流变流器输出功率; R_T 和 X_T 分别是变压器的电阻和电抗; U_d 和 I_d 分别为直流侧的电压和电流。在稳态方式下,直流变流器的计算模型为

$$\begin{cases} \dot{I} = (\dot{U}_s - \dot{U}_c) / (R + jX_L) \\ \dot{S}_s = P_s + jQ_s \\ P_s = -|Y|U_s U_c \cos(\delta + \alpha) + |Y|U_s^2 \cos \alpha \\ Q_s = -|Y|U_s U_c \sin(\delta + \alpha) + |Y|U_s^2 \sin \alpha \\ P_c = |Y|U_s U_c \cos(\delta + \alpha) - |Y|U_s^2 \cos \alpha \\ Q_c = -|Y|U_s U_c \sin(\delta + \alpha) + |Y|U_s^2 \sin \alpha \\ P_d = U_d I_d = |Y|U_s I_c \cos(\delta + \alpha) - |Y|U_c^2 \cos \alpha \\ U_c = \mu M U_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: 相角差 $\delta = \theta_s - \theta_c$; 导纳 $|Y| = 1 / \sqrt{R_T^2 + X_L^2}$; 阻抗角 $\alpha = \arctan(X_T / R_T)$; μ 为直流电压利用率; M 为换流器的调制比,取值均为 0~1。

1.2 无功备用优化目标函数

本文定义无功备用优化目标函数如式(3)所示。

$$\max Q_{GR} = \max w_G^T (Q_{Gc} - Q_{G0}) \quad (3)$$

式中: Q_{GR} 为本文定义的全系统总无功备用; w_G^T 为无功备用权系数; Q_{Gc} 和 Q_{G0} 分别是系统发电机在临界点和基态情况下的无功出力向量。

本文定义发电机无功备用权系数如式(4)。

$$w_{Gi} = \sum_{j \in N_{PQ}} \frac{\partial V_j}{\partial V_{Gi}} \cdot \frac{\partial Q_{Gi}}{\partial Q_j} \cdot p_j \quad (4)$$

式中: w_{Gi} 为发电机 i 的无功备用权系数; N_{PQ} 为系统的 PQ 节点集; $\frac{\partial V_j}{\partial V_{Gi}}$ 代表节点 j 电压对发电机端电压的灵敏度; $\frac{\partial Q_{Gi}}{\partial Q_j}$ 为发电机节点 i 的无功出力对于节点 j 无功扰动的灵敏度; p_j 代表节点 j 对主稳模式的参与因子。

1.3 无功备用优化约束条件

直流子系统潮流约束方程如式(5)所示。

$$\begin{aligned}
0 &= F_{d1}(V_t, x_d) = V_d - c\hat{T}_d\hat{V}_t \cos \theta_d + \hat{R}_{cd}I_d \\
0 &= F_{d2}(V_t, x_d) = I_d - G_d V_d \\
0 &= F_{d3}(V_t, x_d) = P_d - \hat{V}_d I_d \\
0 &= F_{d4}(V_t, x_d) = P_d^2 + Q_d^2 - (kc\hat{T}_d\hat{V}_t I_d)^2
\end{aligned} \quad (5)$$

式中: $x_d = [V_d, I_d, P_d, \cos \theta_d, Q_d, T_d]$ 为直流子系统变量; V_t 为含换流站的交流节点电压向量; V_d 为直流电压向量; I_d 为注入直流电流向量, 正方向从换流站指向直流线路; T_d 为变压器变比向量; θ_d 为控制角向量, 整流侧为触发角, 逆变侧为熄弧角; R_{cd} 为换相电阻向量, 整流侧 $R_{cd} > 0$, 逆变侧 $R_{cd} < 0$; P_d 为有功功率向量, 正方向从换流站指向直流线路; Q_d 为无功功率向量, 正方向从换流站指向直流线路; $c = 3\sqrt{2}/\pi$; 考虑换相效应, $k = 0.995$ 。

交流子系统潮流方程约束为

$$\begin{aligned}
0 &= F_p(x_a, x_d, \lambda) = f_p(\theta, V) + P_d - P_a(\lambda) \\
0 &= F_q(x_a, x_d, \lambda) = f_q(\theta, V) + Q_d - Q_a(\lambda)
\end{aligned} \quad (6)$$

式中: $x_a = [\theta, V]$ 为交流子系统变量; θ 为交流节点电压相角向量; V 为交流节点电压幅值向量; $P_a = P_G - P_L$ 为交流系统注入有功功率向量; Q_a 为交流系统注入无功功率向量; $f_p(\theta, V)$ 为注入有功函数; $f_q(\theta, V)$ 为注入无功函数。

基态运行点处状态变量及控制变量约束可表示为

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (7)$$

$$Q_{G,\min} \leq Q_{G0} \leq Q_{G,\max} \quad (8)$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \quad (9)$$

式中: V 代表节点电压幅值及其相角; Q_{G0} 为发电机的基态无功出力; u 为控制变量, 包括发电机端电压, 节点无功补偿量, 可调变压器变比, 为简化计算, 本文控制变量均作连续化处理; 下标 max 和 min 代表上限和下限。

综上所述, 式(1)一式(9)构成本文所提考虑直流线路接入的无功备用优化模型。

2 优化模型求解过程

2.1 灵敏度求解方法

本文定义如式(4)的无功备用权系数。需首先求取控制变量之间的灵敏度信息, 电压稳定临界点处方程可表示为

$$\begin{cases} F(x_c, \lambda_c) = 0 \\ F_x(x_c, \lambda_c)^T \omega = 0 \\ a^T \omega - 1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $F(\cdot) = 0$ 为潮流方程; x_c, λ_c 分别为临界点处

的状态变量和负荷增长因子; ω 为潮流雅可比阵 f_x 的零特征值对应的左特征向量; a 为用于归一化 ω 的非零常数向量。

对式(10)进行微分可得

$$\begin{bmatrix} F_x & F_\lambda & 0 \\ (F_x^T \omega)_x & 0 & F_x^T \\ 0 & 0 & a^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial x_c}{\partial y} \\ \frac{\partial \lambda_c}{\partial y} \\ \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_y \\ (F_x^T \omega)_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $(F_x^T \omega)_x$ 与 $(F_x^T \omega)_y$ 的表达式较为复杂。 $F_x^T \omega$ 的表达式为

$$F_x^T \omega = \begin{bmatrix} (\frac{\partial f_p}{\partial \theta})^T \omega_1 + (\frac{\partial f_q}{\partial \theta})^T \omega_2 \\ (\frac{\partial f_p}{\partial V})^T \omega_1 + (\frac{\partial f_q}{\partial V})^T \omega_2 + (\frac{\partial F_d}{\partial V})^T \omega_3 \\ (\frac{\partial P_d}{\partial x_d})^T \omega_1 + (\frac{\partial Q_d}{\partial x_d})^T \omega_2 + (\frac{\partial F_d}{\partial x_d})^T \omega_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

则 $\frac{\partial f_p}{\partial \theta}$, $\frac{\partial f_p}{\partial V}$, $\frac{\partial f_q}{\partial \theta}$, $\frac{\partial f_q}{\partial V}$ 的表达式为

$$\frac{\partial f_p}{\partial \theta}(\theta, V, Y_{bus}) = \text{Re}[\hat{V}(jY_{bus}\hat{V})^* + j\hat{I}^*\hat{V}]$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial \theta}(\theta, V, Y_{bus}) = \text{Im}[\hat{V}(jY_{bus}\hat{V})^* + j\hat{I}^*\hat{V}]$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial V}(\theta, V, Y_{bus}) = \text{Re}[\hat{V}(Y_{bus}(\hat{V}/V))^* + \hat{I}^*(\hat{V}/V)] \quad (13)$$

$$\frac{\partial f_q}{\partial V}(\theta, V, Y_{bus}) = \text{Im}[\hat{V}(Y_{bus}(\hat{V}/V))^* + \hat{I}^*(\hat{V}/V)]$$

$$\hat{V} = V \cdot e^{j\theta}$$

$$\hat{I} = Y_{bus}\hat{V}$$

式中: Y_{bus} 为系统导纳阵; V, I 分别为节点电压向量和注入电流向量; \hat{V}, \hat{I} 分别为节点复电压向量和注入复电流向量; \hat{I} 表示以 \hat{I} 为主对角元的对角阵, \hat{I}^* 为 \hat{I} 的共轭阵; 点乘运算 \cdot 表示向量对应元素相乘; 点除运算 $/$ 表示向量对应元素相除; $\text{Re}[\cdot], \text{Im}[\cdot]$ 分别表示取函数的实部和虚部。

以下分析直流变量相关项, $(\frac{\partial F_d}{\partial V})^T \omega_3$ 与

$(\frac{\partial F_d}{\partial x_d})^T \omega_3$ 的表达式为

$$(\frac{\partial F_d}{\partial V})^T \omega_3 = -c\hat{T}_d \cos \hat{\theta}_d \omega_{31} - 2kc\hat{S}_d \hat{T}_d \hat{I}_d \omega_{34} \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{F}_d}{\partial \mathbf{x}_d}\right)^T \boldsymbol{\omega}_3 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{31} - \mathbf{G}_d \boldsymbol{\omega}_{32} - \hat{\mathbf{I}}_d \boldsymbol{\omega}_{33} \\ \hat{\mathbf{R}}_{cd} \boldsymbol{\omega}_{31} + \boldsymbol{\omega}_{32} - \hat{\mathbf{V}}_d \boldsymbol{\omega}_{33} - 2kc \hat{\mathbf{S}}_d \hat{\mathbf{T}}_d \hat{\mathbf{V}}_l \boldsymbol{\omega}_{34} \\ \boldsymbol{\omega}_{33} + 2\hat{\mathbf{P}}_d \boldsymbol{\omega}_{34} \\ -c \hat{\mathbf{T}}_d \hat{\mathbf{V}}_l \boldsymbol{\omega}_{31} \\ 2\hat{\mathbf{Q}}_d \boldsymbol{\omega}_{34} \\ -c \hat{\mathbf{V}}_l \cos \hat{\boldsymbol{\theta}}_d \boldsymbol{\omega}_{31} - 2kc \hat{\mathbf{S}}_d \hat{\mathbf{V}}_l \hat{\mathbf{I}}_d \boldsymbol{\omega}_{34} \end{bmatrix} \quad (15)$$

则电压稳定临界点处发电机无功出力对控制变量的灵敏度为

$$\frac{\partial Q_{Gcj}}{\partial y} = \frac{\partial Q_j}{\partial y} + \frac{\partial Q_j}{\partial \mathbf{x}_c} \frac{\partial \mathbf{x}_c}{\partial y} + \frac{\partial Q_{Lj}}{\partial \lambda_c} \frac{\partial \lambda_c}{\partial y} \quad (16)$$

式中: Q_j 为发电机节点 j 的注入功率; Q_{Lj} 为发电机节点 j 的无功负荷。

通过式(16), 可以直接计算获得式(4)所定义的无功备用权系数, 从而建立本文考虑直流线路接入的无功备用优化模型。

2.2 求解流程

式(1)一式(9)所建立的模型是非线性的优化问题, 但与普通最优潮流不同的是, 在本文这一模型采用如文献[6]的内点法进行求解。

问题求解的难点在于, 式(1)一式(9)模型涉及两个运行状态, 即基态运行点(对应发电机当前出力 Q_{G0}) 和电压稳定临界点(对应发电机当前出力 Q_{Gc}), 且在电压稳定临界点处发电机的状态包含不确定性。因此在临界点发电机状态给定前, 优化模型亦是不确定的, 本文提出一种启发式技巧, 将其转化为普通的最优潮流问题, 其过程如图 2 所示。

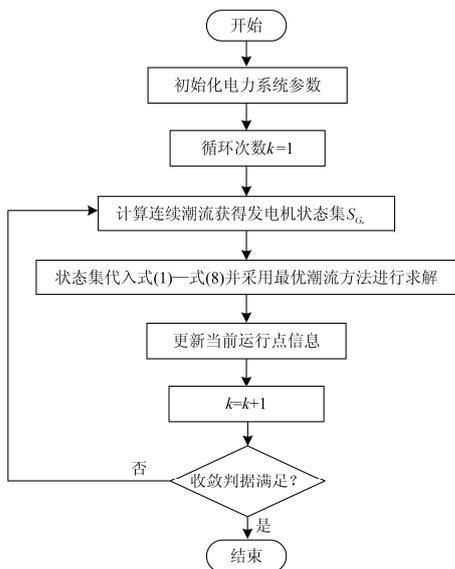


图 2 启发式转化技巧

Fig. 2 Techniques of the transformation

经过以上转化, 原本涉及两个运行状态的最优潮流问题可变为多次普通最优潮流问题的迭代求解。通过最优潮流—连续潮流的交替迭代过程, 发电机的状态集合在每步迭代中均得到更新, 从而保证模型的精确性。

3 算例分析

3.1 算例设置

为检验本文所提方法的有效性, 采用改进 IEEE 39 节点系统对所提方法进行检验, 其系统接线图如图 3 所示。引入 3 条直流输电系统, 整流侧分别为节点 2、10 和 22, 逆变侧分别为节点 8、17 和 26, IEEE 39 扩展算例如图 3 所示。算例中直流输电系统均采用定电流定熄弧角控制, 初始直流电流为 1.0 p.u., 熄弧角为 8.0° , 节点电压上下限分别设为 1.06 和 0.92。

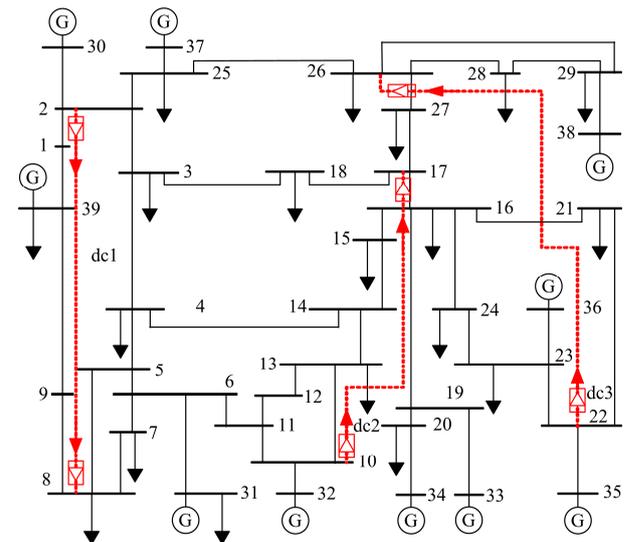


图 3 IEEE 39 扩展系统

Fig. 3 IEEE 39 extended system

3.2 优化结果分析

根据 4.1 节中边界条件, 通过 2.1 节中方法计算得到发电机权系数如表 1 所示。

表 1 发电机权系数

Table 1 Reactive power reserve weights

p.u.			
序号	系数	序号	系数
30	0.772	35	1.000
31	0.523	36	0.217
32	0.361	37	0.211
33	0.332	38	0.179
34	0.127	39	0.562

从表 1 中数据可得, 发电机的权系数具有较大差距, 最大的是发电机 35, 最小的是发电机 38。其主要原因是, 节点 35 和节点 26 相连, 而节点 26 处于系统的电压薄弱区域^[16]。而发电机 38 远离直流线路, 因此对于提高系统电压稳定裕度作用较小。从表 1 数据分析可得, 直流线路的接入, 会改变原系统的潮流分布, 薄弱区域通过直流线路直接与发电机相连, 从而使得部分发电机对电压稳定的支撑作用变强, 这从一个侧面表明, 直流线路对电压稳定具有较大影响, 需对其重点研究。为进一步分析本文方法的优化结果, 优化前后电压稳定裕度如图 4 所示。

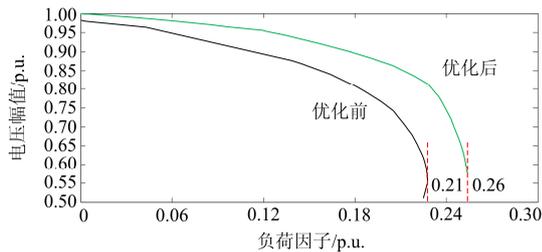


图 4 优化前后电压稳定裕度

Fig. 4 Voltage stability margin before/after optimization

从图 4 中可得, 优化后 IEEE 39 节点的电压稳定裕度得到较大程度提升, 这表明本文所提方法可有效提高系统的安全稳定性。

传统无功优化方法最大的缺陷在于无法分析电压稳定裕度提升的机理。为进一步分析电压稳定裕度提升的原因, 优化前后系统发电机无功备用与权系数关系如图 5 所示。

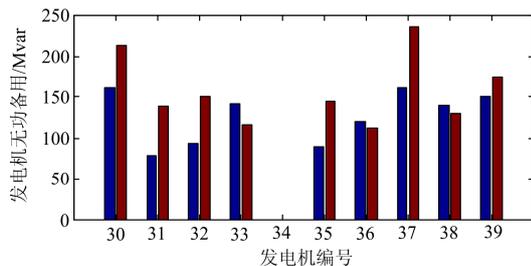


图 5 优化前后发电机无功备用

Fig. 5 Reactive power reserve before/after optimization

从图 5 中可得, 优化后权系数较高的发电机 30、35 和 39 均具有较高的备用水平, 即通过提升关键发电机的备用水平, 可以有效提升系统的电压稳定裕度。

3.3 求解方法效果分析

本文提出一种启发式技巧求解含两个运行状态的问题, 为比较这一技巧和目前方法^[17-19]的优势,

比较结果见表 2。

表 2 各方法求解结果

Table 2 Results of different solutions

方法	电压稳定裕度	计算耗时
文献[17]	0.23	0.11
文献[18]	0.23	0.11
文献[19]	0.25	0.47
本文方法	0.26	0.48

从表 2 中数据可得, 前两种基于逐次线性化的方法计算效率接近, 第 3 种方法精度和计算时间均与本文方法相近, 但该方法却忽略发电机在临界点处的状态变化, 会乐观地估计系统状态, 而本文方法可以较好地对系统状态进行优化, 计算效率也较高, 综上所述, 本文方法可以较好地求解无功备用优化问题。

4 结论

针对直流接入的电力系统, 本文提出一种无功备用定义方法, 并基于此提出一种无功备用优化方法。为求解这一涉及两个运行状态的最优潮流问题, 本文提出一种启发式技巧, 将其转化为常规最优潮流问题和连续潮流的迭代问题。所得结论如下:

- 1) 与直流相连的发电机权系数较大, 证明直流线路的接入会对系统原潮流分布造成较大影响, 从而影响电压稳定性。
- 2) 通过本文方法优化后, 系统的电压稳定裕度得到较大提升, 关键发电机的无功备用得到较大的提升。
- 3) 本文所提启发式技巧具有较强收敛性, 可以提高无功备用优化问题求解的精度, 且具有较高的效率。

参考文献

- [1] CAPITANESCU F. Assessing reactive power reserves with respect to operating constraints and voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2224-2235.
- [2] ARYA L D, SINGH P, TITARE L S. Anticipatory reactive power reserve maximization using differential evolution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35(1): 66-73.
- [3] MENEZES T V, DA SILVA L C P, DA COSTA V F. Dynamic VAR sources scheduling for improving VSM[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 969-971.
- [4] CAPITANESCU F, VAN CUTSEM T. Evaluation of reactive power reserves with respect to contingencies[C]

- // Proc IREP Conf, Onomichi, Japan, 2001: 377-386.
- [5] 方斯顿, 程浩忠, 宋越, 等. 考虑风电相关性的电力系统随机无功备用优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 32-38.
FANG Sidun, CHENG Haozhong, SONG Yue, et al. Stochastic reactive power reserve dispatch method considering correlated wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 32-38.
- [6] 方斯顿, 程浩忠, 马紫峰, 等. 基于机会约束凸松弛的分区随机无功备用优化方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 73-80.
FANG Sidun, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. Stochastic reactive power reserve dispatch method based on limit relaxation of chance constraints considering voltage control areas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 73-80.
- [7] 吕忠, 周强, 蔡雨昌, 等. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang, et al. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [8] 胡晓阳, 王卫平, 王主丁, 等. 一种实用的配电网无功运行两层优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 14-21.
HU Xiaoyang, WANG Weiping, WANG Zhuding, et al. A practical two-phase optimization method of dynamic var optimization in a distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 14-21.
- [9] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.
- [10] RUIZ P A, SAUER P W. Reactive power reserve issues [C] // The 38th North American Power Symposium, Carbondale, USA: IEEE, 2006: 439-445.
- [11] LEONARDI B, AJJARAPU V. Investigation of various generator reactive power reserve (GRPR) definitions for online voltage stability/security assessment[C] // The Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century: IEEE, 2008: 1-7.
- [12] 彭磊, 张建平, 吴耀武, 等. 基于 GA、PSO 结合算法的交直流系统无功优化[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 78-81.
PENG Lei, ZHANG Jianping, WU Yaowu, et al. Reactive power optimization of hybrid AC/ HVDC power system based on genetic algorithm and particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 78-81.
- [13] 张元, 刘明波, 李清. 计及直流功率日调节次数约束的交直流系统无功优化实用化方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 791-796.
ZHANG Yuan, LIU Mingbo, LI Qing. A practical reactive power optimization method of AC/DC power grid incorporated with daily regulation constraints of DC transmission power[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 791-796.
- [14] 邸弢, 李华强, 范镭. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Huaqiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [15] 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.
- [16] FANG S, CHENG H, SONG Y, et al. A new type of MW and MVar dispatch index for meeting voltage stability margin criteria based on normal vector of limit surface[C] // Power & Energy Society General Meeting: IEEE, 2015.
- [17] VENKATESH B, SADASIVAM G, KHAN M A. Fuzzy logic based successive LP method for reactive power optimization[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27: 1141-1160.
- [18] MOUSAVI O A, BOZORG M, CHERKAOUI R. Preventive reactive power management for improving voltage stability margin[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 96(1): 36-46.
- [19] ALIZADEH O, CHERKAOUI R. Maximum voltage stability margin problem with complementarity constraints for multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2993-3002.

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-03-13

作者简介:

马雷鹏(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网无功优化、运行控制; E-mail: maleipeng1990@126.com

韦钢(1958—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为电力系统运行分析、新能源与城市配电网。E-mail: wg5815@sohu.com

(编辑 周金梅)