

基于改进内点法的含双馈型风电场的电力系统无功优化研究

郝晓弘¹ 周勃²

(兰州理工大学计算机与通信工程学院¹, 电气工程与信息工程学院², 兰州 730050)

摘要 针对含双馈型风电场的电力系统无功补偿问题,建立了以有功网损最小、节点电压偏差最小为目标的无功优化模型;并考虑了风电场旋转备用的约束,提出了跟踪中心轨迹内点法实现无功优化。跟踪中心轨迹内点法在传统内点法基础上引入自适应压缩因子,利用自适应压缩因子的动态收敛性,提高算法的局部搜索能力,从而提高算法的效率。在IEEE14系统中进行了仿真测试。实验结果证明了提出的无功优化算法的有效性,算法能较好的减少有功网损;同时使其他目标函数值都得到了不同程度的改善。

关键词 双馈风力发电机 无功优化 自适应压缩因子 改进内点法
中图分类号 TM614; **文献标志码** A

在化石能源逐渐衰竭和全球环境不断恶化的大背景下,新能源的发展越来越受到大家的关注。其中,风力发电由于具有资源可再生、环境污染小、能耗低等优点,且风力发电技术相对成熟,近年来在我国取得迅速发展。但由于风速具有随机性、波动性等特点,导致风电机出力的不确定性,使风电场并网后给原有配电网的潮流带来很大影响^[1-2]。因此,对含双馈型风电场的电力系统进行无功优化研究显得极其重要^[3]。

电力系统无功优化涉及多个控制变量和约束条件,属于典型的非线性优化问题,从优化方法本质来看,主要分为传统的数学优化算法和智能优化算法。智能优化算法由于其高效性,越来越成为研究的重点。文献[4]提出了改进差分进化算法对含风电场的配电网进行无功优化,验证了算法的有效性。文献[5]提出了量子人工蜂群算法,并在该算法中引入概率潮流计算对无功功率进行优化,提高了算法的收敛精度。文献[6]在双馈风电场中引入无功裕度,并采用粒子群算法对无功功率进行优化,文献[7]提出基于改进遗传算法的含风电场多目标无功优化。文献[8]对电网故障时的双馈风电场的无功控制策略进行了相关研究,文献[9]针对各无功控制设备运行时间常数的不同,将风电功率预测数据进行多节点控制。文献[10]针对风电基地无功优

化问题,提出了一种综合考虑无功补偿投资成本及有功备用成本的配置方法。

本文针对含双馈型异步感应发电机的电力系统,并根据双馈异步风力发电机的特点,构建了其恒功率工作下的数学模型,并在此基础上提出了含自适应压缩因子的跟踪中心轨迹内点法^[11,12],将有功网损最小以及节点电压偏差最小作为目标函数。在传统约束条件的基础上,增加了旋转备用的约束。最后,在IEEE14节点标准测试系统中对本文所提出的方法进行了分析。实验结果充分体现了含自适应压缩因子的跟踪中心轨迹内点法无功优化的优化效果较传统优化方法更优的特点,使优化后的线路损耗明显降低。

1 双馈型风力发电机数学模型

风速影响双馈异步风机发出有功功率的大小,功率控制方式影响无功功率的大小,风电机在恒功率因数控制下发出的无功功率与和恒电压控制下发出的无功功率是不同的^[13]。一般将恒功率因数控制时双馈异步组成的风电场视为PQ节点出力,恒压控制时双馈风电机组视为PV节点出力。双馈异步风力发电机等效电路如图1,其简化等值电路如图2^[12]。

在忽略定子绕组电阻的情况下^[14],转子绕组上吸收或发出的有功功率 P_r 为

$$P_r = \frac{r_r x_{ss} (P_s^2 + Q_s^2)}{x_m^2 U_s^2} + \frac{2r_r x_{ss} Q_s}{x_m^2} - sP_s + \frac{r_r U_s^2}{x_m^2} \quad (1)$$

2016年5月20日收到

国家自然科学基金项目

(61263008 61540033) 资助

第一作者简介:郝晓弘(1960—),男,甘肃涇川人,教授,博士研究生导师。研究方向:智能控制理论与应用。

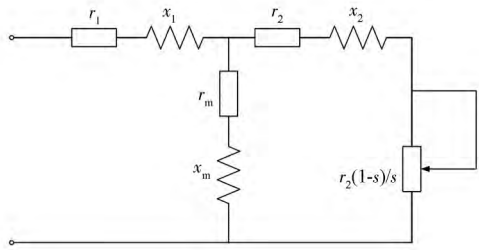


图1 异步风力电动机等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of induction motor

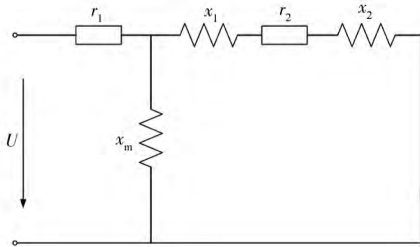


图2 异步风力发电机简化等值电路

Fig. 2 The simplified equivalent circuit of asynchronous wind generator

式(1)中, $x_{ss} = x_s + x_m$, $U_s = |\dot{U}_s|$ 。

风力发电机组注入系统的有功功率 P_e 为

$$P_e = P_s + P_r = \frac{r_r x_{ss} (P_s^2 + Q_s^2)}{x_m^2 U_s^2} + \frac{2r_r x_{ss} Q_s}{x_m^2} + (1-s)P_s + \frac{r_r U_s^2}{x_m^2} \quad (2)$$

双馈异步发电机的实际运行方式一般以恒功率因数为; 因此, 本文主要研究恒功率运行方式下双馈异步风电机组的潮流计算模型。当双馈异步发电机在恒功率因数控制方式运行时, 定子侧功率因数恒定不变^[15]。因流经变流器的有功功率比较小, 且变流器吸收或发出的无功功率也不大, 所以双馈异步电机组的无功功率可以近似看作定子绕组的无功功率 Q_s ^[16]。令 P_s 为定子绕组发出的有功功率, 则当风电机组采用在恒功率因数 $\cos\varphi$ 下运行时, 则双馈异步发电机定子绕组的无功功率 Q_s 为:

$$Q_s = P_s \tan\varphi \quad (3)$$

风电机输出的有功功率 P_e 为

$$P_e = P_s + P_r = \frac{r_r x_{ss} P_s^2}{x_m^2 U_s^2} (1 + \tan^2\varphi) + \left(1 + \frac{2r_r x_{ss} \tan\varphi}{x_m^2} - s\right) P_s + \frac{r_r U_s^2}{x_m^2} \quad (4)$$

风电机输出的无功功率 Q_e 为

$$Q_e = \frac{-bU_s^2 + U_s \sqrt{cU_s^2 + 4aP_e}}{2a} \tan\varphi \quad (5)$$

式(5)中,

$$\begin{cases} a = \frac{r_r x_{ss}^2}{x_m^2} (1 + \tan^2\varphi) \\ b = 1 + \frac{2r_r x_{ss} \tan\varphi}{x_m^2} - s \\ c = (1-s)^2 + \frac{4r_r x_{ss} \tan\varphi}{x_m^2} (1-s) - \frac{4r_r^2 x_{ss}^2}{x_m^4} \end{cases} \quad (6)$$

由 Q_e 可知, 当已知双馈异步机的有功功率、功率因数以及转差时, 电压成为无功功率唯一的变量。

2 含双馈型异步风力发电机的配电网的无功优化数学模型

2.1 目标函数

将有功网损最小和节点电压偏差最小作为目标函数, 并考虑风电场旋转备用对模型的约束, 最终建立含双馈型风电场的配电网无功优化模型。

2.1.1 有功网损最小

将整个电力系统的有功网损作为优化目标函数:

$$\min f_1 = P_{\text{loss}} = \sum_{i,j \in N_l} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos\theta_{ij})$$

式中, P_{loss} 为系统的有功网损; G_{ij} 、 θ_{ij} 分别是节点 i 、 j 之间的电导和电压相角差; U_i 、 U_j 分别是节点 i 、 j 的电压幅值; N_l 是网络输电线路集合。

2.1.2 节点电压偏差最小

节点电压值是检验系统安全性和电能质量的重要指标之一, 因此本文选择节点电压偏差值最小为无功优化目标函数, 其表达式如下。

$$\min f_2 = \Delta U = \sum_{i=1}^{N_L} \left| \frac{U_i - U_i^*}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right|$$

式中, U_i 为节点 i 的电压幅值; U_i^* 为节点 i 的置顶电压幅值, 通常 $U_i^* = 1$; $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 的最大允许电压和最小允许电压; N_L 为系统的负荷节点数。

2.2 约束条件

2.2.1 系统功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i + P_{\text{WFi}} = P_{\text{Di}} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij}) \\ Q_i + Q_{\text{WFi}} = Q_{\text{Di}} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}) \end{cases}$$

式中, P_{WFi} 、 Q_{WFi} 分别为风电场向节点 i 注入的有功功率和无功功率; P_i 、 Q_i 分别为电网输入节点 i 的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导、电纳和节点 i 与 j 之间

的相角差。

2.2.2 正旋转备用容量约束^[17]

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t P_{Ri, up}^t + \sum_{k=1}^{N_l} I_{lk}^t Q_{lk}^t \geq R_{up}^t + R_{wind, up}^t \\ U_{Gi}^t P_{Ri, up}^t + U_{Gi}^t P_{Gi}^t < P_{Gi, max} \end{cases}$$

式中, R_{up}^t 为 t 时段对应负荷预测误差和机组停运的正旋转备用需求; $R_{wind, up}^t$ 为 t 时段应对风电功率波动所需的正旋转备用; $P_{Ri, up}^t$ 为发电机组 i 在 t 时段的正旋转备用容量; $P_{Gi, max}$ 为发电机组 i 的输出功率上限。

2.2.3 负旋转备用容量约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi}^t P_{Ri, down}^t + \sum_{j=1}^{N_l} L_{Sj}^t \geq R_{down}^t + R_{wind, down}^t \\ U_{Gi}^t P_{Ri, up}^t - U_{Gi}^t P_{Ri, down}^t < P_{Gi, min} \end{cases}$$

式中, R_{down}^t 为 t 时段对应负荷预测误差和机组停运的正旋转备用需求; $R_{wind, down}^t$ 为 t 时段应对风电功率波动所需的负旋转备用; $P_{Ri, down}^t$ 为发电机组 i 在 t 时段的负旋转备用容量; $P_{Gi, min}$ 为发电机组 i 的输出功率下限。

2.2.4 不等式约束

$$\begin{cases} Q_{Ci}^{min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{max}, i = 1, 2, \dots, N_C \\ T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max}, i = 1, 2, \dots, N_T \\ 0 \leq P_{DWCi} \leq P_{DWCi}^{max}, i = 1, 2, \dots, N_{DWC} \end{cases}$$

式中: Q_C^{max} 、 Q_C^{min} 是无功电容器投切容量上、下限; T^{max} 、 T^{min} 是线路变压器分接头变比上、下限; P_{DWCi}^{max} 是风机接入容量上限值; N_C 、 N_T 和 N_{DWC} 分别是无功补偿电容器个数、变压器分接头组数和风机接入个数。

3 带自适应压缩因子的跟踪中心轨迹内点优化算法

内点法是在可行域内部寻优,对于大规模线性规划问题,当约束条件和变量数目增加时,内点法的迭代次数变化较少。内点法是一种具有多项式时间复杂性的线性规划算法,其收敛性和计算速度均优于单纯形法,计算时间比单纯形法更快。内点法在形式上与经典障碍法等价,而且对于线性、非线性问题可以统一解法。

由式(4)、式(5)可见,双馈异步发电机发出的有功、无功功率以及风力机转速、风能利用系数及风力机械功率都是滑差 s 的函数。根据能量守恒定律,假设风机的机械功率与电磁功率相等,最终使风力机械能与发电机电磁功率平衡。为此本文采用跟踪中心轨迹内点优化算法,并引入了自适应压缩因

子及滑差修正量。

优化问题的拉格朗日函数为

$$L = \varphi(f(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}^T [g(\mathbf{x}) - 1 - \mathbf{g}] - \mathbf{w}^T [g(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}}] - \mu \sum_{j=1}^r \lg(I_r) - \mu \sum_{j=1}^r \lg(u_r))$$

式中, $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_m]$, $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_m]$, $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_m]$ 均为拉格朗日乘子。 φ 是自适应压缩因子,该问题极小值存在的必要条件是拉格朗日函数对所有变量及乘子的偏导数为零。

特别指出,压缩因子的大小影响算法的收敛性。因此,定义自适应压缩因子如下^[18,19]。

$$\varphi = \frac{1}{\lambda} \lambda e^{1 - \frac{N}{N+1-k}} \quad (7)$$

式(7)中, φ 是压缩因子, λ 为正整数, N 是最大迭代次数, k 是当前迭代次数。引入动态的自适应压缩因子可以增强算法的寻优效率。在迭代开始,较大的自适应压缩因子使算法寻优的范围更广,而在迭代后期,较小的压缩因子使算法具有更优的局部寻优能力。

由于风力发电机的有功、无功为其自身滑差和节点电压的函数,而内点法求解风力发电机的有功、无功的计算涉及目标函数、等式约束及不等式的雅克比和海森矩阵的计算。由于篇幅所限,此处不再给出目标函数等式约束及不等式的雅克比和海森矩阵的计算的推导过程,直接给出结果如下。

3.1 等式约束雅克比矩阵

$$\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} \end{bmatrix}_{28 \times 28};$$

$$\frac{\partial \mathbf{g}_4}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{41}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g_{42}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial V_1} & \frac{\partial g_{42}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial V_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial \theta_{14}} & \frac{\partial g_{42}}{\partial \theta_{14}} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial \theta_{14}} \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial V_{14}} & \frac{\partial g_{41}}{\partial V_{14}} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial V_{14}} \end{bmatrix}_{28 \times 17}。$$

3.2 不等式约束的雅克比矩阵

$$\frac{\partial g_4}{\partial \bar{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{41}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g_{42}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial V_1} & \frac{\partial g_{42}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial V_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial \theta_{14}} & \frac{\partial g_{42}}{\partial \theta_{14}} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial \theta_{14}} \\ \frac{\partial g_{41}}{\partial V_{14}} & \frac{\partial g_{42}}{\partial V_{14}} & \dots & \frac{\partial g_{417}}{\partial V_{14}} \end{bmatrix}_{28 \times 17}$$

$$\sum_{i=1}^{17} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial P_G^2} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial P_G \partial Q_G} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial P_G \partial x} c_{5+5+14+i} \\ \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial Q_G \partial P_G} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial Q_G^2} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial Q_G \partial x} c_{5+5+14+i} \\ \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial x \partial P_G} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial x \partial Q_G} c_{5+5+14+i} & \frac{\partial^2 g_{4i}}{\partial x^2} c_{5+5+14+i} \end{bmatrix}$$

以上是内点法计算时所需要构建的矩阵方程, 而带压缩自适应因子的跟踪中心轨迹内点法的计算流程如图 3 所示。

3.3 目标函数的海森伯矩阵

$$\frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \bar{x}^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_1 \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_1 \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_1 \partial V_{14}} \\ \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_1 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_1 \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_1 \partial V_{14}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_{14} \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_{14} \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_{14}^2} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial \theta_{14} \partial V_{14}} \\ \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_{14} \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_{14} \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_{14} \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial V_{14}^2} \end{bmatrix}_{28 \times 28}$$

3.4 等式约束海森伯矩阵

$$A_{P_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial \theta_1 \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial \theta_1 \partial V_{14}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial V_{14} \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial V_{14} \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial V_{14} \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 \Delta P_i}{\partial V_{14}^2} \end{bmatrix}_{14 \times 28};$$

$$A_{Q_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial \theta_1 \partial V_{14}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial V_{14} \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial V_{14} \partial V_1} & \dots & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial V_{14} \partial \theta_{14}} & \frac{\partial^2 \Delta Q_i}{\partial V_{14}^2} \end{bmatrix}_{14 \times 28}$$

3.5 不等式约束海森伯矩阵和拉格朗日乘子的乘积

$$\nabla_x^2 g(x)(z+w) = \sum_{i=1}^5 \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial P_G^2} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial P_G \partial Q_G} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial P_G \partial x} c_i \\ \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial Q_G \partial P_G} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial Q_G^2} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial Q_G \partial x} c_i \\ \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial x \partial P_G} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial x \partial Q_G} c_i & \frac{\partial^2 g_{1i}}{\partial x^2} c_i \end{bmatrix} + \dots +$$

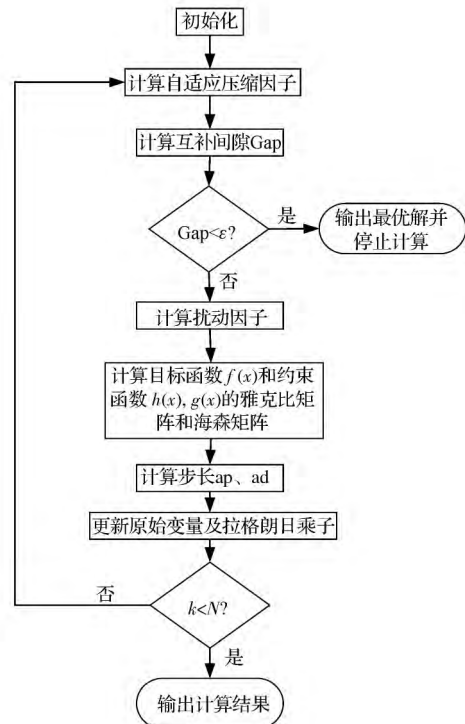


图 3 基于内点法的含双馈型风电场无功优化控制流程
Fig. 3 Reactive power optimization control process based on interior point method for doubly fed wind farm

4 算例分析

4.1 算例系统

本文采用改进的内点优化算法对如图 4 所示 IEEE-14 节点系统进行仿真验证, 并用 MATLAB 编出算法程序。如图 4 所示, 系统节点 1、2、3、6 接入发电机, 同时在系统节点 8 接入风电场。该风电场由 6 台 1.5 MW 的恒功率双馈异步风力发电机组组成, 总装机容量为 9 MW, 将该风电场等效为 1 台 DFIG。风电场的运行参数为: $r_s = 0.001692$ p.u., $x_s = 0.09985$ p.u., $r_r = 0.00373$ p.u., $x_r = 0.10906$ p.u., $x_m = 3.54708$ p.u. 接入系统线路阻抗为 $0.1134 + j0.3495$ p.u.。在系统节点 9 安装可投切的并联电容器组, 配置情况如表 1 所示。

表 1 并联电容数据

Table 1 Shunt capacitance data

节点号	电纳/S	可调上限/Mvar	可调下限/Mvar
9	0.19	0.50	0.10

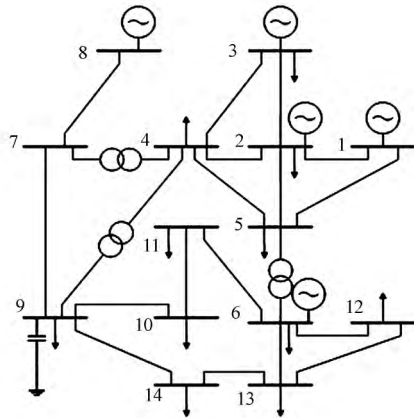


图 4 IEEE-14 节点电力系统接线图

Fig. 4 IEEE-14 node power system wiring diagram

4.2 优化结果

算例中采用了基本遗传算法、量子粒子群算法以及本文所提出的改进内点算法共 3 种算法进行比较。对上述 IEEE14 节点标准测试系统进行了算例验证 种群规模 $N = 100$,迭代次数取 100。各算法收敛特性曲线对比结果如图 5 所示 ,由图 5 可以看出 遗传算法(GA)、量子粒子群算法(QPSO)容易陷入局部最优点,而本文提出的改进内点法(IIPM)在迭代到第 9 次、第 18 次时,能够及时跳出局部最优点,重新寻找最优解。并且由于自适应压缩因子的引入,在迭代至第 20 次时,算法收敛速度加快,并最终收敛于无功优化的最优解。

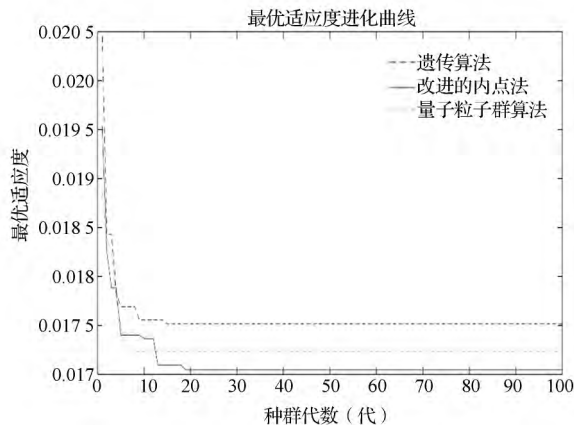


图 5 几种优化算法收敛特性曲线对比图

Fig. 5 Reactive power compensation gap change process chart

通过改进内点法对电力系统进行无功优化后发

电机的有功、无功出力情况如表 2 所示。由表 2 可知,含风电场的电力系统进行无功优化后,能使电力系统内各个发电机出力上下限均在可控范围内,整个电力系统达到稳定,降低了发生风险的几率。

表 2 无功优化后发电机出力情况

Table 2 Optimization of generator output

发电机节点	发电机有功功率/MW	发电机无功功率/Mvar
1	0.755 5	0.300 0
2	0.500 0	0.353 6
3	0.800 0	0.293 2
6	0.109 8	0.015 8
8	0.450 0	0.017 1

含风电场的电力系统进行无功优化后,其系统内部有功网损的下降情况如表 3 所示。由表 3 可知,遗传算法(genetic algorithm, GA)、量子粒子群算法(quantum particle swarm optimization, QPSO)以及本文所提出的改进内点法(IIPM)都可以较好的对含风电场的电力系统进行无功优化。但通过三种智能算法的对比可知,本文所提出的改进内点法(improved interior point method, IIPM)可以更好的减少网损消耗,从而更好的提高了系统运行的安全水平,并且提高了整个电网运行的经济水平。

表 3 优化前后有功网损对比

Table 3 Comparison of active power loss before and after optimization

算法	优化前网损/MW	优化后网损/MW	下降比例/%
GA	0.033 2	0.017 5	47.29
QPSO	0.033 2	0.017 2	48.19
IIPM	0.033 2	0.017 0	48.81

5 结论

本文对含双馈型风电场的电力系统的数学模型及潮流计算问题进行了相关研究。考虑到双馈风力发电机由于其受风力影响,出力不均匀的特性,本文通过数学分析,将其简化为理想化的恒功率模型风力发电机模型,并在此基础上,提出含自适应压缩因子的跟踪中心轨迹内点法。将改进内点法应用至场接入双馈型风电的 IEEE14 节点测试系统进行无功优化测试,并将最终的优化结果与遗传算法以及量子粒子群算法进行对比。优化结果进一步表明本文提出的改进内点法的全局搜索能力强,优化效果好,可以对电力系统进行有效的无功优化。经过优化后能较好的减少有功网损,并使含风电场的电力系统内部其他目标函数值都得到了不同程度的改善,从而保证了整个电力系统运行的安全水平以及提高了电网运行的经济水平,为进一步解决电力系统无功

优化问题提供了一种新的思考途径。

参 考 文 献

- 张丽英,叶延路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施. 中国电机工程学报, 2010; 30(25): 1—9
Zhang Liying, Ye Yanlu, Xin Yaozhong, *et al.* Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power. Proceedings of CSEE, 2010; 30(25): 1—9
- 康龙云,郭红霞,吴捷,等. 分布式电源及其接入电力系统若干研究课题综述. 电网技术, 2010; 34(11): 43—47
Kang Longyun, Guo Hongxia, Wu Jie, *et al.* Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system. Power System Technology, 2010; 34(11): 43—47
- Datta R, Rangnathan V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine: a comparison with alternative schemes. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002; 17(3): 414—421
- 段建东,杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化. 电力自动化设备, 2013; 33(11): 123—127
Duan Jiandong, Yang Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG with farms. Electric Power Automation Equipment, 2013; 33(11): 123—127
- 邓吉祥,丁晓群,张杭,等. 基于量子人工蜂群算法的风电场多目标无功优化. 电测与仪表, 2015; 53(3): 11—17
Deng Jixiang, Ding Xiaqun, Zhang Hang, *et al.* Multi-objective reactive power optimization for wind farm based on quantum artificial bee colony algorithm. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015; 53(3): 11—17
- 孙伟伟,付蓉,陈永华. 计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制. 电力自动化设备, 2014; 34(10): 81—85
Sun Weiwei, Fu Rong, Chen Yonghua. Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin. Electric Power Automation Equipment, 2014; 34(10): 81—85
- 赵亮,吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化. 电力自动化设备, 2010; 30(10): 84—88
Zhao Liang, Lü Jianhong. Multi-objective reactive power optimization of wind farm based on improved genetic algorithm. Electric Power Automation Equipment, 2010; 30(10): 84—88
- 王成福,梁军,冯江霞,等. 故障时刻风电系统无功电压协调控制策略. 电力自动化设备, 2011; 31(9): 14—17
Wang Chengfu, Liang Jun, Feng Jiangxia, *et al.* Coordinated var-voltage control during fault of wind power system. Electric Power Automation Equipment, 2011; 31(9): 14—17
- 贾俊川,刘晋,张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略. 中国电机工程学报, 2010; 33(30): 87—92
Jia Junchuan, Liu Jin, Zhang Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system. Proceedings of CSEE, 2010; 33(30): 87—92
- 王洪涛,刘雪芳,袁志皓,等. 含风电场群的区域电网两层多阶段电压协调控制方法. 电力系统保护与控制, 2012; 40(22): 1—7, 13
Wang Hongtao, Liu Xuefang, Yun Zhihao, *et al.* Two-tier and multi-stage voltage coordination control method for regional power grid with farms. Power System Protection and Control, 2012; 40(22): 1—7, 13
- 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社, 2003
Wang Xifan, Fang Wanliang, Du Zhengchun. Modern power system analysis. Beijing: China Science Press, 2003
- 刘明波,谢敏,赵维兴. 大电网最优潮流计算. 北京: 科学出版社, 2010
Liu Mingbo, Xie Min, Zhao Weixing. Optimal power flow calculation of large power grid. Beijing: China Science Press, 2010
- 陈宁,房婷婷,汤奕,等. 考虑运行风险的风电基地无功配置方法. 电网技术, 2013; 37(11): 3022—3029
Chen Ning, Fang Tingting, Tang Yi, *et al.* An approach to configure reactive power in wind power base considering operational risk of power grid. Power System Technology, 2013; 37(11): 3022—3029
- Engelhardt S, Erlich I, Feltes C. Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generation. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2011; 26(1): 364—372
- 胡卫红,王玮,王英林,等. 电力系统潮流计算中风电场节点的处理方法. 华北电力技术, 2006; 10: 12—15
Hu Weihong, Wang Wei, Wang Yinglin, *et al.* Power flow analysis in electrical power system including wind farms. North China Electric Power, 2006; 10: 12—15
- 王海超,周双喜,鲁宗相,等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用. 电网技术, 2005; 29(18): 59—62
Wang Haichao, Zhou Shuangxi, Lu Zongxiang, *et al.* A joint iteration method for load flow calculation of power system containing unified wind farm and its application. Power System Technology, 2005; 29(18): 59—62
- 陈建华,吴文传,张伯明,等. 风电受限下的大电网有功实时控制模型与策略. 中国电机工程学报, 2012; 32(28): 1—6
Chen Jianhua, Wu Wenchuan, Zhang Boming, *et al.* An active power real-time control method for large power grid under wind power curtailment. Proceedings of the CSEE, 2012; 32(28): 1—6
- 陈道君,龚庆武,金朝意,等. 基于自适应扰动量子粒子群算法参数优化的支持向量回归机短期风电功率预测. 电网技术, 2013; 37(4): 974—980
Chen Daojun, Gong Qingwu, Jin Zhaoyi, *et al.* Short-term wind power prediction based on support vector regression machine optimized by adaptive disturbance quantum-behaved particle swarm optimization. Power System Technology, 2013; 37(4): 974—980
- 钱伟懿,王艳杰. 带自适应压缩因子粒子群优化算法. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010; 29(5): 949—952
Qian Weiyi, Wang Yanjie. Particle swarm optimization algorithm with self-adaptive constriction factor. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2010; 29(5): 949—952

Reactive Power Optimization Based on Modified Interior Point Method for Power System with DFIG Wind Farms

HAO Xiao-hong¹, ZHOU Bo²

(College of Computer and Communication¹, College of Electrical and Information Engineering², Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China)

[Abstract] Reactive power compensation for the power system with doubly fed wind farm was studied, meanwhile established the reactive power optimization model based on minimum active power loss and the minimum node voltage deviation, a tracking center locus interior point method was proposed to achieve reactive power optimization. An adaptive compression factor is introduced into the traditional interior point method based on the tracking center trajectory interior point method, by using the dynamic convergence of the adaptive compression factor, the local search ability of the algorithm was improved, and the efficiency of the algorithm is improved. The simulation test is carried out in the IEEE14 system, the experimental results show the effectiveness of the proposed reactive power optimization algorithm, the algorithm can reduce the active power loss, and the other objective function value can be improved to different extent.

[Key words] dfig reactive power optimization adaptive compression factor improved interior point method

(上接第 230 页)

Fault Diagnosis and Research of Friction and Wear of Piston Assembly Based on the Single Cylinder Diesel Engine Abnormal Surface Acoustic Emission Signal

WANG Huan-huan¹, GU Feng-shou^{1,2*}, WANG Tie¹, LI Guo-xing^{1,2}, ZHAO Jie¹

(Department of Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology¹, Taiyuan 030024, P. R. China; Centre for Efficiency and Performance Engineering, University of Huddersfield², HD1 3DH, U. K.)

[Abstract] In order to diagnosis and analysis of abnormal acoustic emission signal of a single cylinder diesel engine, the vibration sensor and the acoustic emission sensor are mounted in the diesel engine cylinder block, by using wavelet multiresolution algorithm comparison analysis of the two sensor signals. Firstly through the geometry estimate abnormal signals may correspond to the two faults is proposed. Then according to the teardown inspection, confirm the acoustic emission signal of fault feature from piston assembly between the abnormal friction events. Diagnostic results shown that: due to the unreasonable design of the structure and size of the types of single cylinder diesel engine piston assembly, in the normal work of the diesel engine, small head of the connecting rod and piston internal occurred friction events, and led to the acoustic emission signal in fixed crankshaft angle appear abnormal peak response. Acoustic emission technique provides a more accurate diagnosis method for the effective monitoring of the friction and wear of the piston assembly in the future.

[Key words] acoustic emission diesel engine friction and wear fault diagnosis