

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210722

提高双馈风电机组动态无功协调控制能力的实验研究

崔森, 颜湘武, 李锐博

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 随着风电场规模不断增加, 风电机组并网对电网的影响逐渐增大, 故充分挖掘风电机组的无功电压调节能力和提高机组的无功响应速度对增强电力系统的电压稳定性具有重要作用。定量分析了蒙西电网某风电场单台双馈感应风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)的无功电压调节能力及限制因素, 根据其单台机组的无功调节机理制定动态无功补偿协调控制策略。若系统无功需求超过 DFIG 无功出力极限时, 在保证机组最大发电效益的基础上, 提出基于无功差值的双馈感应风力发电机组有功附加控制。并且通过改进的遗传控制算法辨识得到附加控制器参数, 该控制在降低机组最小出力的同时确保提高机组无功出力极限, 进而满足系统无功需求。最后通过实验验证了所提出的双馈风电机组动态无功协调控制的可行性和准确性, 增强了机组的电压稳定能力。

关键词: 双馈风电机组; 电压稳定; 动态无功控制; 改进遗传算法

Experimental research on improving the dynamic reactive power coordinated control capability of doubly-fed induction wind turbine

CUI Sen, YAN Xiangwu, LI Ruibo

(Hebei Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: As the scale of wind farms continues to increase, the impact on the grid of wind turbines connected to the grid is gradually increasing. Therefore, fully exploiting the reactive power and voltage regulation capability of wind turbines and improving their reactive power response speed plays an important role in enhancing the voltage stability of the power system. This paper quantitatively analyzes the reactive voltage regulation capability and limiting factors of a single doubly-fed induction wind turbine in a wind farm in the West Mengxi Power Grid. It formulates a dynamic reactive power compensation coordinated control strategy based on the reactive power regulation mechanism of a single unit. If the system reactive power demand exceeds the DFIG reactive power output limit, on the basis of ensuring the maximum power generation benefit of the unit, an additional active power control based on the reactive power difference is proposed. In addition, the parameters of the additional controller are obtained through an improved genetic control algorithm identification. This control reduces the minimum output of the unit while ensuring the increase of the reactive power limit of the unit. This in turn meets the reactive power demand of the system. Finally, the experiment verifies the feasibility and accuracy of the proposed dynamic reactive power coordinated control of the doubly-fed wind turbines, and it enhances the voltage stability of the generators.

This work is supported by the Beijing Natural Science Foundation (No. 3212037).

Key words: doubly-fed wind turbine; voltage stability; dynamic reactive power control; improved genetic algorithm

0 引言

目前双馈感应风力发电机组(DFIG)的装机容量约占 90% 的市场份额, 是主流机型之一^[1-5]。但随之

而来的大规模风电并网所带来的电网电压安全稳定问题亟待解决^[6-10]。

目前风电场无功补偿主要有投入额外无功补偿装置^[11-14]和开发挖掘机组本身无功补偿能力^[15-19]两种方式。在风电场内部无功补偿装置协调控制方面, 文献^[11-12]提出了风电场与动态无功补偿装置

基金项目: 北京市自然科学基金项目资助(3212037)

STATCOM 间的无功电压协调控制策略, 抑制风电场内无功功率波动。文献[13-14]提出 DFIG 和静止无功补偿器的协调控制策略, 均衡馈线上各风电机组的机端电压裕度。以上措施在大中型集中式风电场并网节点处配置相应装置, 无法适应分散式风电机组随机、灵活的分布特点, 且系统运行受随机风速影响较大, 其外部装置的投切很难快速响应风速对电网的影响, 无法实时响应动态无功补偿, 加入电力电子器件将会增加安装成本。因为风电机组大多没有运行在满发工况, 具备一定的无功输出能力, 故挖掘 DFIG 定子和网侧变流器无功调节能力, 制定相应的协调控制策略具有重要意义。

目前, 在双馈感应发电机的无功控制方面, 文献[15-16]提出 DFIG 机组无功极限能力的计算方法, 文献[17-18]提出关于机组无功控制和无功分配策略研究, 其中文献[17]对定子和网侧变流器控制进行对比, 得到相对网侧变流器的无功控制对系统功率波动的影响较大, 确定 DFIG 定子侧无功控制的优先级要高于网侧变流器。文献[18]采用网侧变流器无功电压下垂控制, 实现电压频率协调控制, 文献[19]利用 DFIG 定子侧和网侧变流器无功协调控制, 提出一种动态无功支撑系统, 提高其机组无功调节能力。在风电机组无功控制优化方面, 文献[20-21]在保证机组最大发电效益的基础上以风电场的最小有功网损为目标, 采用粒子群算法优化风力发电机组的无功出力, 文献[22]利用等微增率法对风电场内的有功网损求最优值, 实践表明该无功优化方案提高了电压合格率。但以上研究均为 DFIG 在满足系统无功需求下进行的正常控制, 一旦系统无功需求增大, 风电机组的无功补给不足, 此时风电场接入电网的连接点电压不稳, 严重影响电网安全稳定。文献[23]以双馈风电场调度部门下发功率指令限制条件, 通过分配机组的有功功率输出得出双馈风电场最优无功控制策略来提高无功极限满足系统无功需求, 但响应速度较慢, 且风电机组本身并不具备协调控制来提高无功极限能力, 终究是不完善的, 文献[24]提出一种短暂降低风能利用率的双馈风力发电机组变转速模式控制策略, 以能达到机组最大无功出力下其转子转速最优为控制目标来制定 DFIG 变转速模式控制策略, 但控制过程相对复杂, 在工程应用上受到限制。文献[25]提出了一种基于双馈感应发电机组的无功功率动态协调控制策略, 在电网电压故障下, 双馈感应风力发电机利用 PV 下垂特性曲线来控制转子侧变流器降低机组定子有功功率输出, 进而提高机组无功极限能力, 虽然在一定程度上提高了 DFIG 机组的无功极限能

力, 但没有考虑到机组的发电效益, 无功控制需要进一步优化。且上述无功协调控制方法均没有得到实验验证, DFIG 的实际无功输出能力急需得到评估。

针对上述研究所存在的问题, 本文研究了蒙西电网某风电场 1.5 MW 双馈感应发电机组的无功调节能力及相关限制因素, 根据 DFIG 定子和网侧变流器的调节能力确定两者的无功分配方案, 在保证发电效益的基础上, 即最小限度减小有功出力的同时提高机组无功出力极限, 从而满足系统无功需求, 提出基于无功差值的双馈感应风力发电机有功附加控制, 其中通过改进的遗传控制算法辨识得到控制器参数, 最后通过实验验证了所提方法的正确性。

1 DFIG 系统的无功调节能力

1.1 DFIG 定子侧的无功功率调节能力

DFIG 定子电流 I_s 和转子电流 I_r 分别可表示为^[26]

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{P_s}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{Q_s}{U_s}\right)^2} \quad (1)$$

$$I_r = \sqrt{\left(\frac{X_s P_s}{X_m U_s}\right)^2 + \left(\frac{U_s}{X_m} + \frac{X_s Q_s}{X_m U_s}\right)^2} \quad (2)$$

式中: P_s 、 Q_s 分别为定子输出有功和无功功率; U_s 为定子侧电压; X_s 和 X_m 分别为机组的定子电抗和励磁电抗; 以上均为标么值。

在定子电流最大值 $I_{s,max}$ 的约束下, 通过式(1)得到 DFIG 定子侧无功功率 Q_s 的约束范围为

$$-\sqrt{U_s^2 I_{s,max}^2 - P_s^2} \leq Q_s \leq +\sqrt{U_s^2 I_{s,max}^2 - P_s^2} \quad (3)$$

在转子侧电流最大值 $I_{r,max}$ 的约束下, 通过式(2)得到 DFIG 定子侧无功功率 Q_s 的约束范围为

$$\begin{aligned} -\frac{U_s^2}{X_s} - \sqrt{\left(U_s \frac{X_m}{X_s} I_{r,max}\right)^2 - P_s^2} \leq Q_s \leq \\ -\frac{U_s^2}{X_s} + \sqrt{\left(U_s \frac{X_m}{X_s} I_{r,max}\right)^2 - P_s^2} \end{aligned} \quad (4)$$

DFIG 定子侧无功功率 Q_s 同时受到式(3)和式(4)的约束。本文以蒙西电网某风电场 1.5 MW 的 DFIG 为例, 得到该机组在机端电压 0.9~1.1 p.u. 下定子侧无功功率运行范围, 如图 1 所示。在额定电压下 DFIG 定子侧最大无功输出能力范围在 0~1.0 Mvar(定子侧额定容量 0~77%), 其最大吸收无功能力范围在 0~1.3 Mvar(定子侧额定容量 0~100%)。随着机端电压由 1.1 p.u. 减小至 0.9 p.u. 时, DFIG 定子侧吸收或发出无功功率的可运行范围也随之减小。

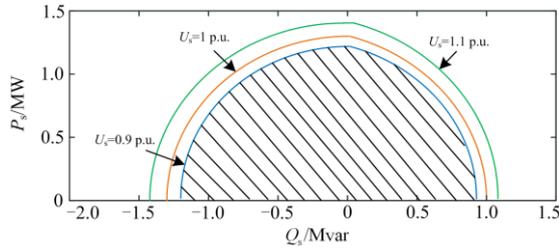


图 1 DFIG 定子侧有功和无功功率的运行范围

Fig. 1 Operating range of active power and reactive power at the stator side of DFIG

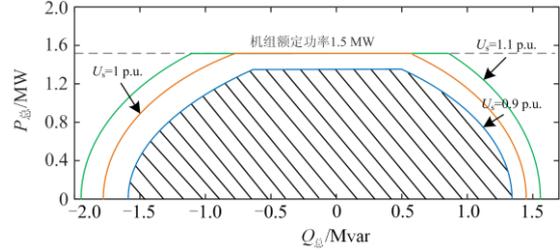


图 3 DFIG 系统总有功和无功功率运行范围

Fig. 3 Operating range of total active and reactive power of DFIG system

1.2 DFIG 网侧变流器的无功功率调节能力

DFIG 的网侧变流器电流 I_g 可表示为

$$I_g = \sqrt{\left(\frac{P_g}{U_s}\right)^2 + \left(\frac{Q_g}{U_s}\right)^2} \quad (5)$$

式中, P_g 、 Q_g 分别为网侧变流器输出有功功率和无功功率。网侧变流器无功功率 Q_g 的约束范围为

$$-\sqrt{U_s^2 I_{g-\max}^2 - P_g^2} \leq Q_g \leq +\sqrt{U_s^2 I_{g-\max}^2 - P_g^2} \quad (6)$$

仍以上述蒙西电网某风场 1.5 MW 的 DFIG 为例, 通过式(6)计算得到本文所提出的机组网侧变流器在机端电压为 0.9~1.1 p.u. 时的无功调节能力范围如图 2 所示。其最大无功运行范围呈对称分布, 如机组在额定电压下, 网侧变流器无功功率无论是吸收还是输出的范围均在 0~0.49 Mvar(网侧变流器额定容量 0~100%)。并与其定子侧的相关规律一致, 机端电压越低, 其无功功率运行范围越小。

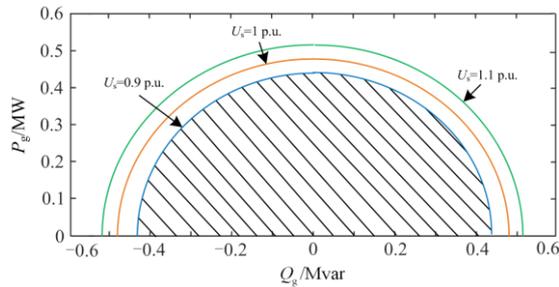


图 2 网侧变流器有功和无功功率的运行范围

Fig. 2 Operating range of the active and reactive power of the grid-side converter of DFIG

1.3 DFIG 系统的总无功功率调节能力

综合图 1 和图 2 得到纵坐标为 DFIG 系统总的有功输出, 横坐标为机组总的无功功率运行范围曲线, 如图 3 所示。如在额定电压下, DFIG 系统随着有功功率变化, 其总无功输出能力调节范围在 0.58~1.51 Mvar, 系统总无功吸收能力调节范围在 0.78~1.78 Mvar。同样得到 DFIG 系统总的无功调节能力随机端电压的增大而增强。

2 DFIG 系统的无功改进控制策略

2.1 正常无功运行控制策略

目前较多实际故障工况下, 相比较于 DFIG 系统吸收无功能力, 其无功输出能力更为受到关注。已知 DFIG 系统定子侧无功控制的稳定性要优于其网侧变流器的无功控制^[17], 系统总的无功需求用 Q_G 表示。

定子无功控制策略如图 4 所示, 若系统无功需求 Q_G 尚未达到机组定子侧无功输出能力的极限值, 则系统无功需求 Q_G 均由机组定子侧提供, 若系统无功需求 Q_G 的值大于机组定子侧无功输出能力极限值, 该机组定子侧无功输出量按照其极限值 $Q_{s\max}$ 提供。网侧变流器无功控制框图如图 5 所示, 若系统无功需求 Q_G 尚未达到机组定子侧无功输出能力极限值, 该网侧变流器不动作, 即不输出无功功率; 系统无功需求 Q_G 与机组定子侧无功极限值 $Q_{s\max}$ 做差得到 $Q_G - Q_{s\max}$, 当该差值小于网侧变流器可发出无功极限值 $Q_{g\max}$ 时, 网侧变流器按照 $Q_G - Q_{s\max}$ 输出无功功率, 若该差值大于 $Q_{g\max}$ 时, 则网侧变流器按照其最大无功极限值 $Q_{g\max}$ 输出无功功率。上述 DFIG 定子和网侧变流器无功协调控制策略保证了定子侧无功控制的优先级高于网侧变流器, 且最大无功输出均不超过其限值。

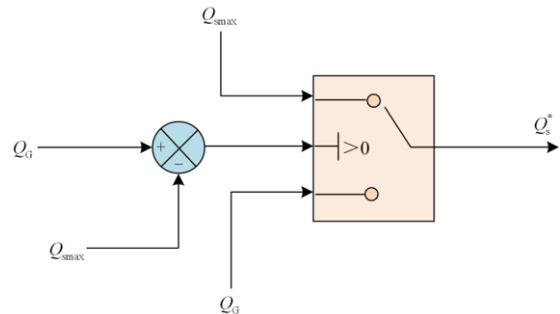


图 4 DFIG 定子无功控制

Fig. 4 Reactive power control of DFIG stator

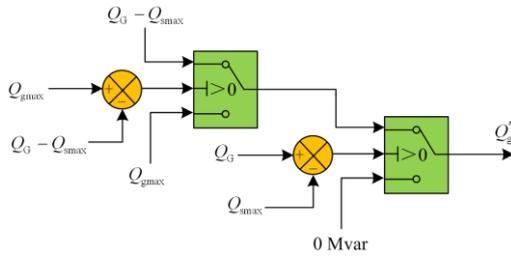


图 5 网侧变流器无功控制

Fig. 5 Reactive power control of grid side converter

2.2 无功缺额下的有功功率附加控制

若系统无功需求 Q_G 超过 DFIG 无功出力极限值 Q_{\max} 且无其他无功功率补给电网时，风电场并网点电压会出现振荡等失稳现象，严重影响电网安全稳定。根据 2.1 节分析，可通过降低 DFIG 定子侧的有功出力从而提高机组无功极限值来满足整个系统无功需求增大的情况。故本文在风电机组最大功率跟踪基础上增加了基于无功差值的有功附加控制，如图 6 所示。当系统无功需求 Q_G 尚未达到机组

总的无功出力极限值 Q_{\max} 时，附加控制器不动作，风机按照最大功率跟踪控制运行；当系统无功需求 Q_G 超过机组总的无功出力极限值 Q_{\max} 时，附加控制器动作，此时所需的无功功率缺额 $(Q_G - Q_{\max})$ 经过 PI 控制器生成最小有功功率的减小值 ΔP_s 。

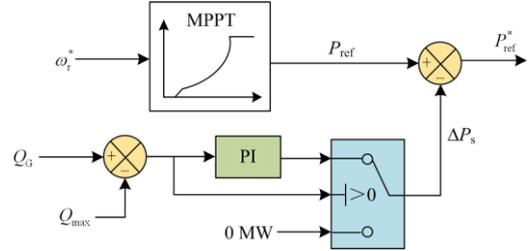


图 6 有功功率附加控制

Fig. 6 Active power additional control

综上所述，本文所提出的双馈感应风力发电机的新型动态无功协调控制策略系统框图如图 7 所示，红色、蓝色和绿色框图分别为定子无功控制、网侧无功控制和有功功率附加控制。

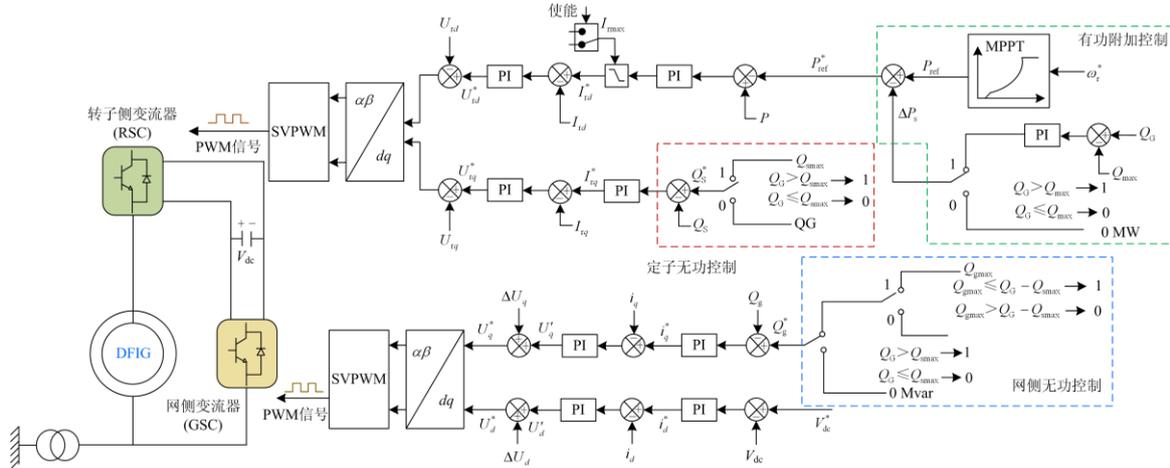


图 7 双馈感应风力发电机系统控制框图

Fig. 7 Control block diagram of doubly-fed induction wind turbine system

文献[27]提出了采用遗传控制算法优化双馈感应风力发电机组的暂态控制器、电磁转矩带阻尼控制器和无功带阻尼控制器参数，改善了电力系统暂态和动态稳定性能，为本文精确得到 PI 控制器参数提供了参考，但传统遗传控制算法存在全局搜索能力差，容易陷入局部最优解的问题。本文针对此问题提出采用改进遗传算法，在辨识过程中以 PI 控制参数作为改进遗传算法的自变量，以式(7)的最小值作为改进遗传算法的目标函数，其中式(7)的前者保证 DFIG 总无功输出极限值与系统无功需求相等，后者保证机组发电效益最大，使其有功减小值

ΔP_s 最小。

$$\min F = \int_{t_0}^{t_1} t |Q_G - Q_{\max}| dt + |\Delta P_s| \quad (7)$$

式中：积分下限 t_0 为系统无功需求 Q_G 大于 DFIG 无功极限值 Q_{\max} 的时刻；积分上限 t_1 为系统无功需求 Q_G 小于等于机组无功极限值 Q_{\max} 的时刻。

基于改进遗传算法的双馈风力发电机组无功缺额的有功功率附加控制器参数具体流程如图 8 所示。在辨识过程中以双馈风力发电机有功附加控制器 PI 参数为改进遗传算法的自变量，假定以风机初始风速由 11.4 m/s 逐渐升至 13 m/s，电网系统初始

无功需求由 0.2 Mvar 突增至 0.7 Mvar 为系统激励, 根据上述目标函数不断修正自变量的值, 实现对自变量的准确辨识。

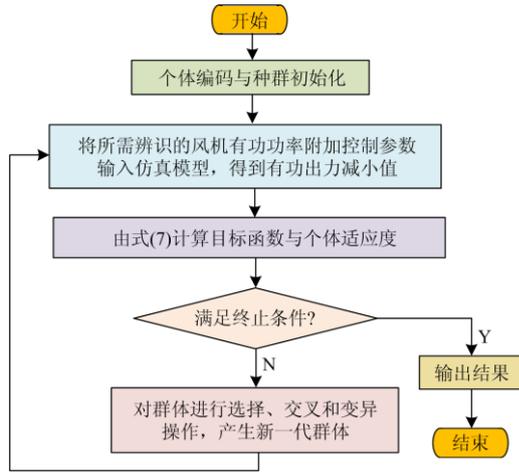


图 8 基于改进遗传算法的控制参数辨识流程

Fig. 8 Identification process of control parameters based on IGA

1) 编码。首先导入风电场实测数据 F_R , 对其种群进行初始化, 即将双馈感应风力发电机的有功功率附加控制器 PI 参数值表示为基因编码的形式, 为更精准地得到该参数值, 将该 PI 参数值设置为连续变量, 采用浮点编码方式。

2) 适应度函数。计算上述种群中自变量的适应度, 根据目标函数判断是否达到终止条件, 达到条件则得到上述最优自变量的取值, 已知传统遗传控制算法的适应度函数 $F' = 1/F$, 虽然可体现该算法每代最优个体适应度值, 但无法直观表示整个种群, 为增强种群对比性, 综合考虑种群初始个体和最优个体, 本文对适应度函数进行改进, 对应的目标函数值越小, 适应度函数的值就会越大, 优化效果越好, 进而根据适应度的分配情况选择再生个体, 其被选中的概率由相应适应度的高低确定, 本文适应度分配函数采用 Rank 法^[28], 克服了比例适应度计算的尺度和过早收敛问题。其中适应度函数为

$$F' = \frac{F_a - F_i}{F_a - F_b + \gamma} + \frac{F_a - F_b}{F_i - F_b + \gamma} \quad (8)$$

式中: F_i 为种群中第 i 个个体的目标函数值, 即在保证机组满足无功需求下有功减小量的期望指标; F_a 和 F_b 分别为第 i 个个体所在整个种群中目标函数的初始值和最优值; γ 为一个防止式(8)分母为零的变量。

3) 遗传操作。将最优保存法和轮盘法结合使用, 即通过轮盘赌法作为选择算子, 根据最优保存法将每次遗传的最优个体直接复制到下一代。已知

传统遗传算法交叉率和变异率为固定值, 为使得算法计算效率更高且防止算法陷入局部收敛, 本文在已有自适应交叉变异率^[29]的基础上, 提出

$$P_c = \begin{cases} P_{e_{\max}} - \frac{P_{e_{\min}}(f_{\max} - f_e)}{P_{e_{\max}}(f_{\max} - f_{\text{avg}})} & f_e \geq f_{\text{avg}} \\ P_{e_{\max}} & f_e < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m_{\max}} \frac{f_{\max} - f_m}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f_m \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m_{\max}} & f_m < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_c 为自适应交叉率(其中, $P_{e_{\min}}$ 为最小, $P_{e_{\max}}$ 为最大); P_m 为自适应变异率($P_{m_{\max}}$ 为最大); f_e 为相互交叉个体较大的适应度值; f_m 为要变异个体的适应度值; f_{\max} 为群体中最大适应度值; f_{avg} 为整个群体的平均适应度值。

通过上述遗传变异操作不断修正上述自变量参数, 使目标函数最小, 从而保证满足机组无功极限与无功需求相等的前提下机组有功减小值最低, 进而辨识出最佳风机的无功缺额有功附加控制器 PI 参数值。改进遗传控制算法的收敛速度可采用测试函数 Rastrigin Function 如图 9 所示, 其中计算公式为

$$\text{Ras}(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2) \quad (11)$$

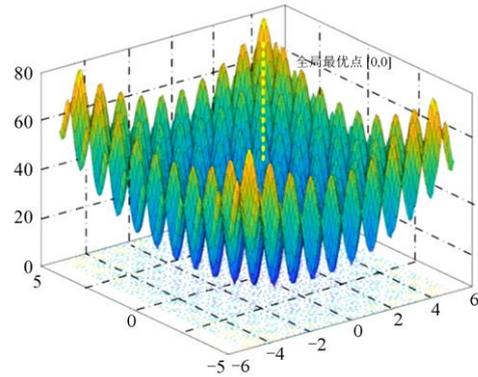


图 9 Rastrigin 函数

Fig. 9 Rastrigin function

通过对单纯形法^[30-31]、传统遗传算法和改进遗传算法进行测试, 结果如表 1 所示, 可知单纯形法全局寻优速度较快, 但全局收敛性不强, 容易出现“早熟”问题。而本文所提出的改进遗传算法的全局搜索能力较强, 可相对迅速准确地找到全局最优点。

经过仿真运算后得出该自变量在单纯形法、传统遗传算法和改进遗传算法下的辨识结果, 如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 采用单纯形法在种群第

14 代时其目标函数值达到最小值, 收敛速度较快, 但仅寻到局部最优解, 其辨识结果如表 2 所示。采用传统遗传控制算法在其种群第 55 代时达到目标函数最小值。而本文所提出的改进遗传算法控制下种群在第 19/20 代时其自变量所对应目标函数值即保证提高机组无功极限来满足系统无功需求的前提下使得机组有功减小值最小, 个体适应度最优, 说明此时所进化出的个体(风机的无功缺额有功功率附加控制器 PI 参数)是采用改进遗传算法所寻求出的全局最优解, 此时系统参数辨识结果如表 2 所示。

表 1 测试结果

Table 1 Test results

类别	单纯形法	传统遗传算法	改进遗传算法
测试次数	1 000	1 000	1 000
全局收敛/%	2	76.8	98
平均时间/s	0.15	0.24	0.2

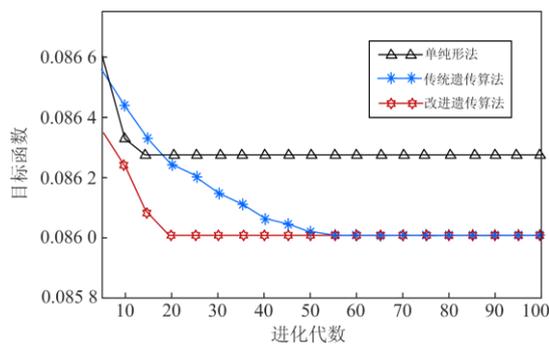


图 10 目标函数仿真曲线

Fig. 10 Objective function simulation curve

表 2 实际系统参数辨识结果

Table 2 Identification results of actual system parameters

类别	名称	参数名	辨识结果
单纯形法	有功附加控制器	K_p	0.1
	参数/p.u.	K_i	1
改进遗传算法	有功附加控制器	K_p	0.2
	参数/p.u.	K_i	0.8

3 算例分析

仿真模型如图 11 所示, 仿真参数如表 3 所示。设置工况如下: 风速在 5.5 s 之前为 11.4 m/s, 在 5.5~12 s 风速逐渐升至 13 m/s。整个电网系统无功

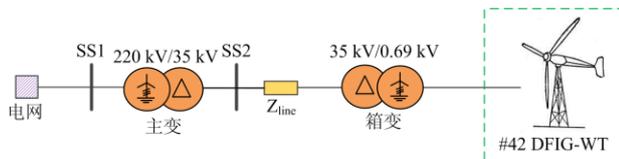


图 11 DFIG 并网系统图

Fig. 11 DFIG grid-connected system diagram

需求在 16 s 前均为 0.2 Mvar, 在 16 s 时系统无功需求突增至 0.7 Mvar。

表 3 DFIG 仿真参数

Table 3 DFIG simulation

部件	参数	数值
风轮机	额定风速 $v/(m/s)$	12.5
	叶轮半径 R/m	38.5
	空气密度 $\rho/(g/m)$	1.25
发电机	额定功率 P/MW	1.5
	额定电压 U/V	690
	定子电阻 $R_s/p.u.$	0.004 9
	定子漏抗 $L_{\sigma s}/p.u.$	0.092 4
	转子电阻 $R_r/p.u.$	0.005 5
	转子漏抗 $L_{\sigma r}/p.u.$	0.099 5
	激磁电抗 $L_m/p.u.$	3.952 8
变流器	网侧额定容量 P_{GSC}/MVA	0.45
	机侧额定容量 P_{RSC}/MVA	0.45
变压器	箱变变比/kV	0.69/35
	主变变比/kV	35/230
电网	电网等效阻抗/p.u.	0.059

注: 电网等效阻抗以 100 MVA、230 kV 为基准。

该机组风速和系统无功需求具体公式分别如式(12)和式(13)所示, 其风速模拟曲线和电网无功需求曲线见图 12 和图 13 所示。

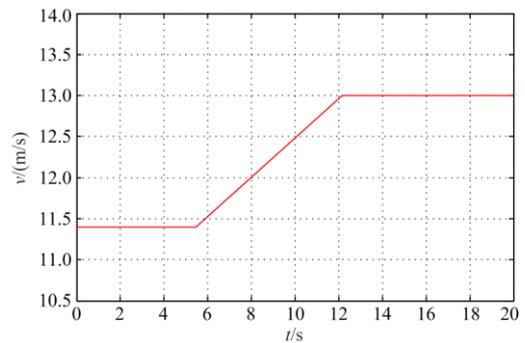


图 12 风速曲线

Fig. 12 Wind speed curve

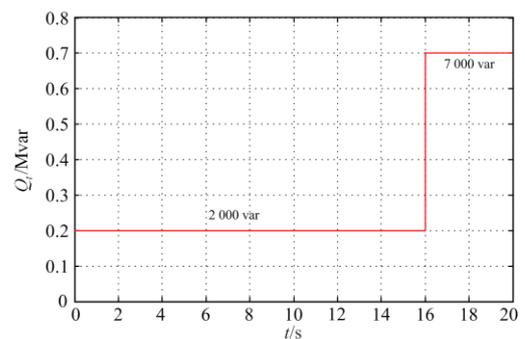


图 13 电网系统无功需求曲线

Fig. 13 Power grid system reactive power demand curve

$$v = \begin{cases} 11.4 \text{ m/s} & 0 < t < 5.5 \text{ s} \\ \left(\frac{15}{65}t + \frac{653}{65}\right) \text{ m/s} & 5.5 \text{ s} < t < 12 \text{ s} \\ 13 \text{ m/s} & 12 \text{ s} < t < 20 \text{ s} \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_G = \begin{cases} 0.2 \text{ Mvar} & 0 < t < 16 \text{ s} \\ 0.7 \text{ Mvar} & 16 \text{ s} < t < 20 \text{ s} \end{cases} \quad (13)$$

为进一步体现本文所提出的基于改进遗传算法的DFIG动态无功控制策略的优势,在上述工况下将单纯形法优化附加控制参数后的仿真进行对比研究。图14所示为上述全工况下两种不同方法所对应的双馈风电机组定子有功功率输出曲线图,很明显可以看出,在相同无功缺额情况下采用本文所提方法的机组有功功率的减小量较低。在 $t = 16 \text{ s}$ 时,机组已无法满足系统的无功需求,此时基于无功缺额的有功附加控制器启动,采用本文所提方法的机组定子有功出力由 1.29 MW 降低至 1.22 MW ,而采用单纯形法辨识得到的有功附加控制器参数全局收敛性不强,仅找到了局部最优解,故使得相同无功缺额下的机组定子有功功率降低至 1.2 MW ,有功功率减小量相对高出 22.2% ,严重影响了风力发电机组的发电效益。

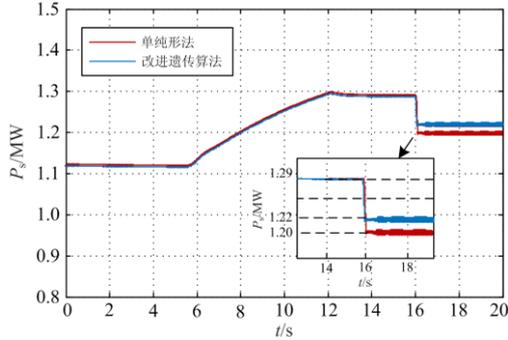
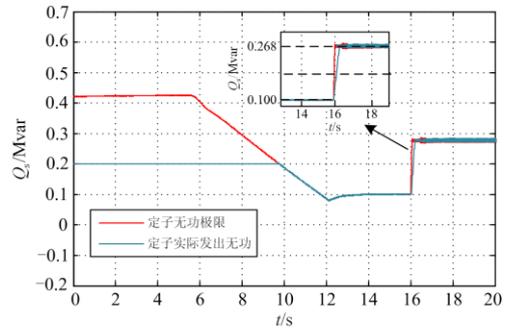


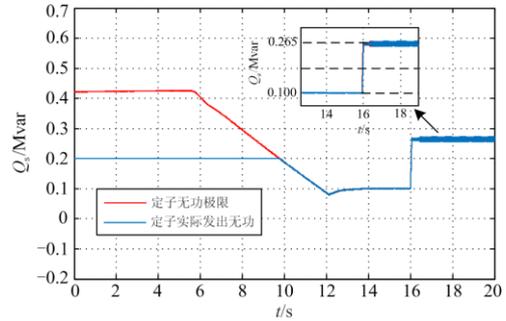
图14 双馈感应风力发电机定子有功功率输出曲线
Fig. 14 Stator active power output curve of DFIG

图15(a)和图16(a)所示分别为单纯形法优化附加控制参数后得到的DFIG定子和网侧变流器输出无功功率曲线图,图15(b)和图16(b)所示分别为本文所提出的基于改进遗传算法优化控制参数得到的双馈感应发电机定子无功功率曲线图和网侧变流器输出无功功率曲线图。

表4为上述工况下两种不同方法得到有功附加控制参数时机组定子有功输出功率、定子侧无功极限及无功实际出力值和网侧变流器无功极限及无功实际出力值。由于在 $5.5 \sim 12 \text{ s}$ 风速为变化阶段,不在本文研究范围内,故省略该阶段数据,仅对系统稳定运行数据进行统计。



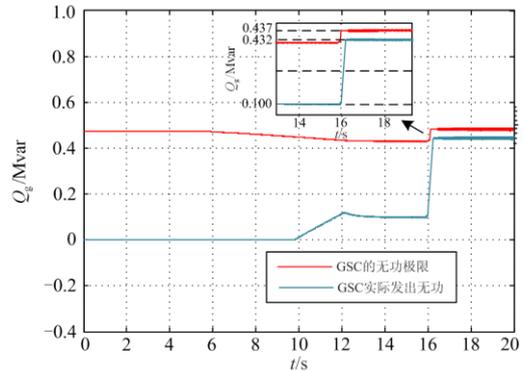
(a) 单纯形法



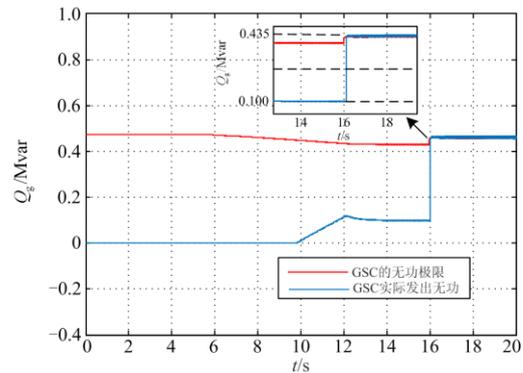
(b) 改进遗传算法

图15 双馈感应发电机定子侧输出无功功率曲线图

Fig. 15 Reactive power output curve of DFIG on stator side



(a) 单纯形法



(b) 改进遗传算法

图16 双馈感应发电电网侧输出无功功率曲线图

Fig. 16 Grid-side output reactive power curve of DFIG

表 4 不同方法下系统稳定运行阶段各变量数值

Table 4 Numerical value of each variable in the stable operation stage of the system under the different methods

方法对比	单纯形法			基于改进遗传控制算法		
时间 t/s	0~5.5	12~16	16~20	0~5.5	12~16	16~20
风速 $v/(m/s)$	11.4	13	13	11.4	13	13
系统无功需求 $Q_G/Mvar$	0.2	0.2	0.7	0.2	0.2	0.7
定子有功功率 P_s/MW	1.12	1.29	1.2	1.12	1.29	1.22
定子无功极限值 $Q_{smax}/Mvar$	0.42	0.1	0.268	0.42	0.1	0.265
定子实际无功功率 $Q_s/Mvar$	0.2	0.1	0.268	0.2	0.1	0.265
网侧无功极限值 $Q_{gmax}/Mvar$	0.474	0.43	0.437	0.474	0.43	0.435
网侧实际无功功率 $Q_g/Mvar$	0	0.1	0.432	0	0.1	0.435

已知在 5.5~12 s, 风速由 11.4 m/s 增加至 13 m/s, 此时 DFIG 机组处于超同步运行状态, 随着机组有功功率的增加, 其定子侧和网侧变流器的无功功率极限值均逐渐较小, 本文研究规定机组定子侧无功控制的优先级高于网侧变流器控制, 当系统无功需求尚未达到机组定子无功极限值时, DFIG 网侧变流器不发出无功, 定子侧将提供系统所需无功功率。在单纯形法优化有功附加控制参数下可由表 4、图 15(a)和图 16(a)所示, 当时间小于 5.5 s 时, 电网系统无功需求为 0.2 Mvar, 尚未达到定子无功极限值 (0.42 Mvar), 故定子无功输出为 0.2 Mvar, 网侧变流器不发出无功。当系统无功需求大于机组定子无功极限值时, 则定子按照其无功极限值发出无功, 其无功缺额由网侧变流器提供, 故在 5.5~12 s, 由于风速增长, 定子有功功率由 1.12 MW 增加至 1.29 MW, 定子侧无功功率极限值由 0.42 Mvar 迅速降低, 在 10 s 时, 电网无功需求值已超过定子无功极限值, 此时额外无功差额由网侧变流器提供。

在 16 s 时, 系统无功需求增加至 0.7 Mvar, 电网无功需求已超过机组总无功极限值, 此时通过启动有功附加控制器来降低风电机组有功功率至 1.2 MW, 从而提高机组的无功输出能力, 其中定子侧无功输出为 0.268 Mvar(极限值为 0.268 Mvar), 网侧无功输出为 0.432 Mvar(极限值为 0.437 Mvar)。而采用本文所提方法的动态无功控制时, 由表 4 及图 15(b)和图 16(b)可知, 在 16 s 时系统无功缺额下机组有功功率仅降低至 1.22 MW, 定子侧无功输出为 0.265 Mvar(极限值为 0.265 Mvar), 网侧无功输出为 0.435 Mvar(极限值为 0.435 Mvar), 可最小限度地降低机组有功出力, 使得定子和网侧变流器无功输出功率均处在极限值, 验证了该优化算法下的目

标函数值最小, 适应度最优, 实现了系统全局最优化和严格收敛。

目前 DFIG 大多处于单位功率因数运行, 仅通过投切外部无功补偿装置忽略了机组自身的无功调节能力, 无法快速实时响应系统无功需求。上述仿真结果同样也验证了 DFIG 定子侧和网侧变流器无功协调控制及附加控制器的准确性。

4 实验验证

本文基于 10 kW 双馈感应风力发电机平台进行实验验证。该平台由一台 15 kW 异步电机作为原动机, 通过联轴器拖动一台 10 kW 双馈感应发电机, DFIG 母线接入电网模拟器并网发电。原动异步电机采用矢量控制, 经变频器接入市电作为拖动电源, 其变频器程序可以实现对风速、风轮、桨距角、齿轮箱等部件的模拟。转子侧和网侧变流器通过快速原型控制器(Rapid Control Prototype, RCP)实时控制。DFIG 实验系统如图 17 所示, 其运行参数如表 5 所示。



图 17 10 kW DFIG 实验系统

Fig. 17 10 kW DFIG experimental system

表 5 10 kW DFIG 实验系统运行参数
Table 5 Operating parameters of 10 kW DFIG

experimental system		
部件	参数	数值
双馈风电机组	额定功率 P/kW	10
	额定风速 $v/(m/s)$	12
	桨距 $A(^{\circ})$	0
	最大风能利用系数 C_p	0.48
	最优叶尖速比 λ	8.1
	叶轮半径 R/m	3.2
	齿轮比 i	6
	极对数 n	2
机侧变流器	额定容量 P_{RSC}/kW	10
	额定电压 U_r/V	220
	额定电流 I_r/A	25
网侧变流器	额定容量 P_{GSC}/kW	5
	额定电压 U_g/V	220
	额定电流 I_g/A	25

为验证本文所提方法的有效性, 与仿真工况类似, 设置实验工况如下: 如图 18 所示为 DFIG 的风速曲线, 在 15 s 以内, 风速恒定为 10.5 m/s, 机组定子侧输出有功功率为 7 500 W, 随后开始增加风速, 在 21 s 时, 风速增加至 10.8 m/s, 风电机组定子侧输出有功功率为 8 600 W, 如图 19 所示。系统无功需求在 27 s 以内时均为 1 300 var, 在 28 s 时, 系统无功需求增加至 4 400 var, 如图 20 所示。

图 19 为 DFIG 定子有功功率输出曲线, 在 28 s 时, 系统无功需求大于机组无功极限值, 此时为满足系统无功需求, 采用本文所提方法后的系统定子有功功率仅降低至 8 000 W, 而采用单纯形法辨识有功附加控制器参数后的风电机组定子有功功率降低至 7 800 W, 故本文所提方法相比于单纯形法辨识得到有功附加控制器参数后的有功功率减小量降低 25%, 大大提高了机组的发电效益。

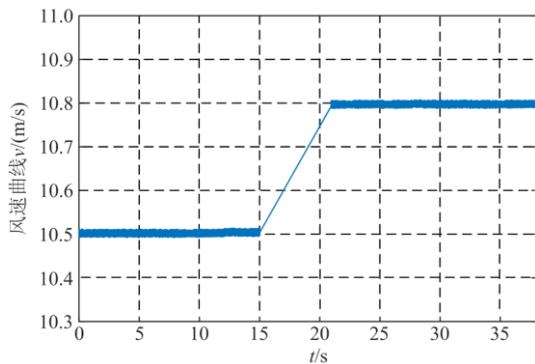


图 18 双馈感应风力发电机组的风速曲线
Fig. 18 Wind speed curve of DFIG

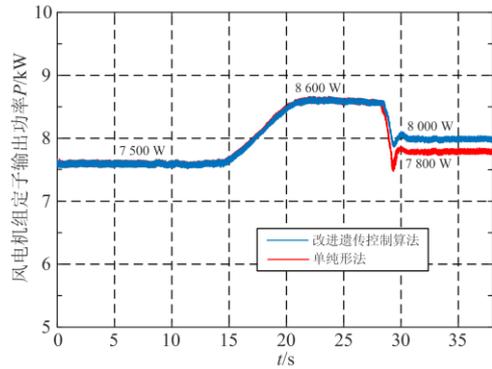


图 19 双馈感应风力发电机组定子有功功率输出曲线
Fig. 19 Stator active power output curve of DFIG

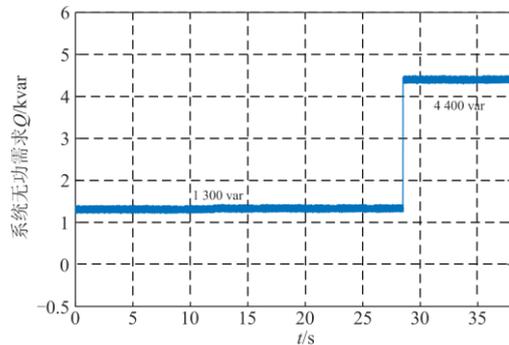
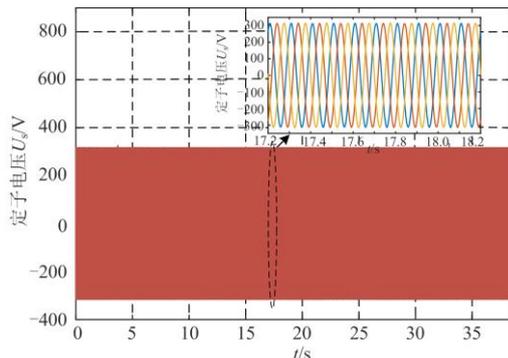


图 20 系统无功需求曲线
Fig. 20 System reactive power demand

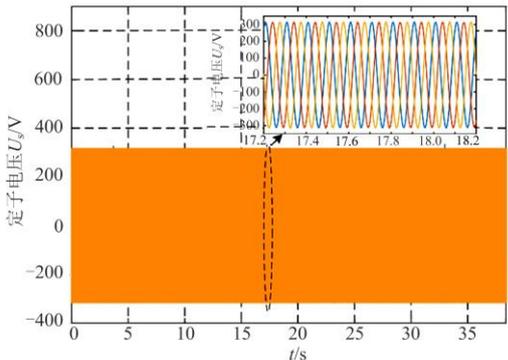
图 21—图 23 分别为上述工况下采用上述两种方法优化有功附加控制器参数后的双馈风电机组动态无功控制的定子电压、定子电流、网侧电流的实际输出曲线, 由图可知本文所提方法相比于单纯形法的定子电流有所增加, 网侧电流相对减小。图 24(a)所示为单纯形法下风电机组的定子侧无功输出功率曲线图, 黄色曲线为定子无功极限值, 蓝色曲线为定子无功功率实际输出值, 已知风速由 10.5 m/s 增加至 10.8 m/s 时, 定子无功极限值 (2 600 var) 随着有功功率的增加随之减小至 700 var, 在时间小于 18 s 时, 系统无功需求 1 300 var 均由定子侧优先承担, 但随着定子无功极限值减小, 定子只能按照无功极限值提供无功, 其无功的缺额 (600 var) 则由网侧变流器承担, 如图 25(a)所示。在时间大于 27 s 后, 系统无功需求增加至 4 400 var, 此时机组总的无功极限值小于电网需求, 故降低机组定子有功出力至 7 800 W, 利用单纯形法得到的附加控制器参数, 由于仅寻到局部最优解, 故使得定子发出无功 2 300 var (极限值为 2 300 var), 网侧变流器发出无功 2 100 var (极限值为 2 600 var)。而采用本文所提改进遗传控制算法得到的附加控制器

参数,可最小限度降低机组定子出力至 8 000 W,并使得定子发出无功 2 000 var,网侧变流器发出无功 2 400 var,均处在无功极限值(图 24(b)和图 25(b))。另外,由实验可得本文所提无功协调控制方法的响应时间在 50 ms 以内,相对于额外配置无功补偿装置,大大提高了机组动态无功响应能力。

根据本文第 1 节分析可同样得到本台实验机组随有功出力变化的总无功运行范围如图 26 所示。已知该风电机组在 21 s 时,风速增加至 10.8 m/s,风电机组定子输出有功功率为 8 600 W,处于超同步运行,此时转差率 s 为-0.07,故机组输出总的有功



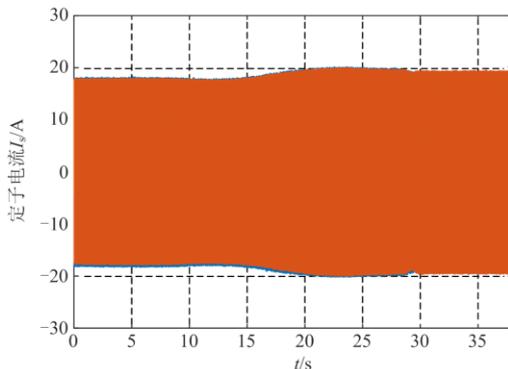
(a) 单纯形法



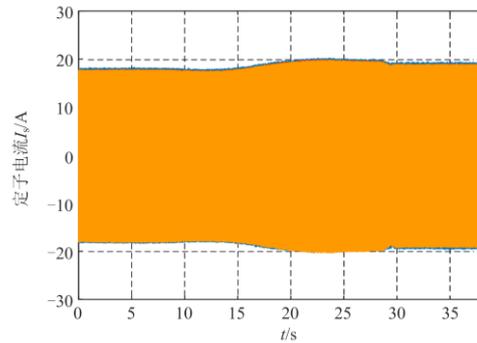
(b) 改进遗传算法

图 21 双馈感应风力发电机组定子电压曲线

Fig. 21 Stator voltage curve of DFIG



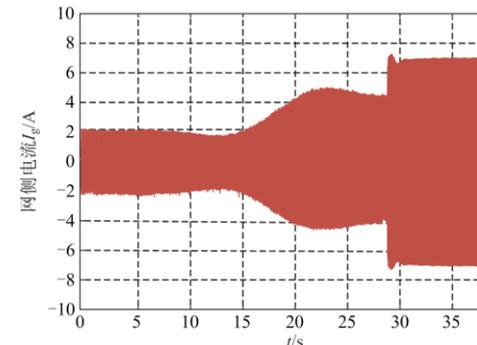
(a) 单纯形法



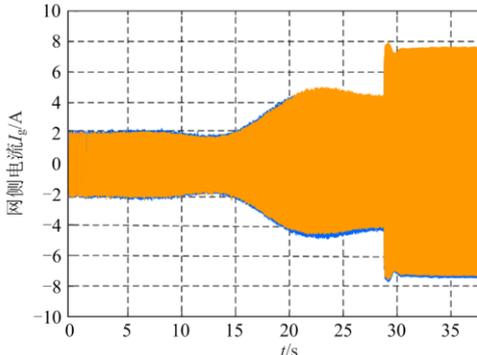
(b) 改进遗传算法

图 22 双馈感应风力发电机组定子电流曲线

Fig. 22 Stator current curve of DFIG



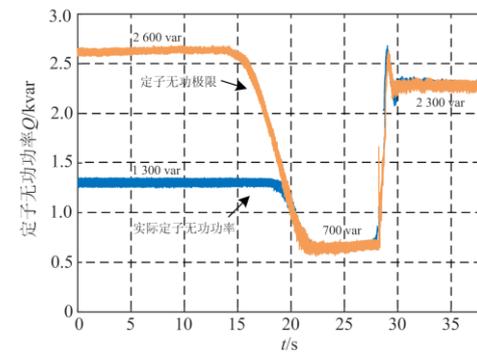
(a) 单纯形法



(b) 改进遗传算法

图 23 双馈感应风力发电电网侧电流曲线

Fig. 23 Grid side current curve of DFIG



(a) 单纯形法

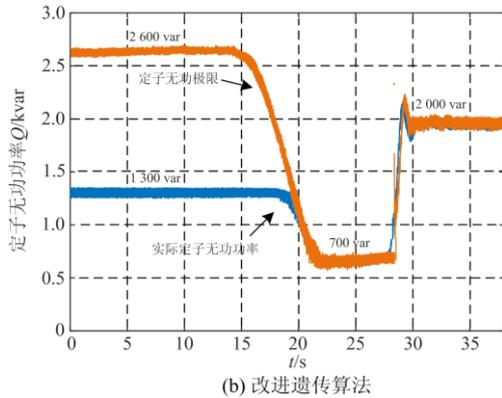


图 24 双馈感应发电机定子输出无功功率曲线图
Fig. 24 Reactive power output curve of DFIG stator

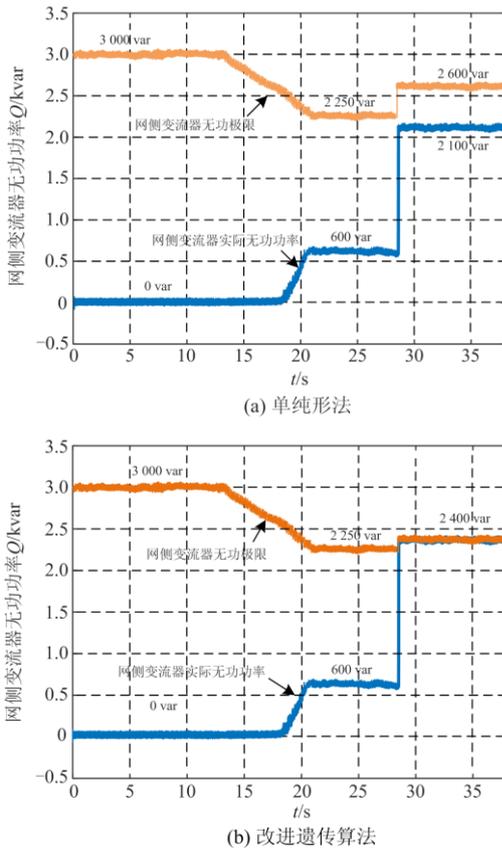


图 25 双馈感应发电电网侧输出无功功率曲线图
Fig. 25 Grid-side output reactive power curve of DFIG

功率为 9 202 W, 根据图 26 所示在该有功功率输出下最大无功输出为 2 950 var, 在 27 s 时, 系统无功需求增加至 4 400 var, 超过机组所能提供的无功极限, 故此时采用本文所提方法, 将风电机组总有功功率输出降至 8 570 MW, 此时由图 26 可知系统可提供最大无功功率提高至 4 400 var, 通过实验验证了采用本文所提方法后的闭环控制系统稳定域得到了改进。

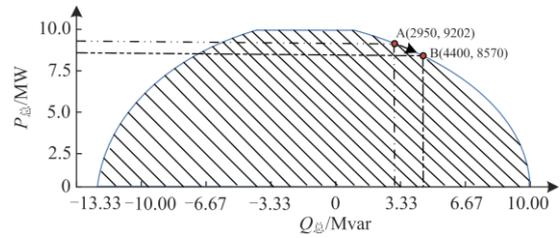


图 26 DFIG 系统总有功和无功功率运行范围
Fig. 26 Operating range of total active and reactive power of DFIG system

5 结语

本文挖掘了 DFIG 机组的自身无功调节能力, 提出该机组新型无功协调控制方式, 通过实验验证了上述控制理论的正确性, 对双馈风电机组的无功控制的升级改造具有借鉴意义。

1) 以蒙西电网某风场容量为 1.5 MW 的双馈风电机组为例, 定量分析了该机组无功调节能力范围, 提出其定子侧和网侧变流器的无功协调控制方法, 可为该机组的无功控制技术升级改造提供理论基础。

2) 当系统无功需求高于风电机组无功输出极限时, 本文采用基于无功缺额的有功功率附加控制方法, 并采用改进的遗传控制算法辨识附加控制器参数, 实现在最低减小有功出力的同时满足系统无功需求, 即在保证发电效益的前提下维护电网系统稳定安全运行。

3) 通过实验验证了所提控制策略的准确性, 得到其无功响应时间在 50 ms 以内, 相比于传统无功补偿装置, 大大提高了系统无功调节响应速度。

参考文献

[1] 王同森, 程雪坤. 计及转速限值的双馈风机变下垂系数控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 29-36.
WANG Tongsen, CHENG Xuekun. Variable droop coefficient control strategy of doubly-fed fan considering speed limit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 29-36.

[2] 颜湘武, 崔森, 常文斐. 考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1027-1039.
YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Primary frequency modulation control strategy of doubly-fed induction generator considering adaptive regulation of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1027-1039.

[3] 邓兆顺, 朱介北, 俞露杰, 等. 实现转子转速保护的双馈异步发电机有功输出速降新方案[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2021, 49(10): 113-122.
- DENG Zhaoshun, ZHU Jiebei, YU Lujie, et al. A novel fast active power output reduction scheme of a DFIG for rotor speed security[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 113-122.
- [4] 颜湘武, 崔森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 111-120.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 111-120.
- [5] 赵鹏程, 王剑钊. 双馈风力发电机组轴系扭振特性研究[J]. *热力发电*, 2020, 49(7): 35-40.
- ZHAO Pengcheng, WANG Jianzhao. Torsional vibration characteristics of double-feed wind turbine shafting[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 35-40.
- [6] 姚骏, 余梦婷, 陈知前, 等. 电网对称故障下含 DFIG 和 PMSG 的混合风电场群的协同控制策略[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(15): 26-36.
- YAO Jun, YU Mengting, CHEN Zhiqian, et al. Cooperative control strategy of hybrid wind farm group containing DFIG and PMSG under symmetrical grid fault[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(15): 26-36.
- [7] 詹锦, 陈波, 熊永新, 等. 利用调相机提升送端双馈风机高电压穿越能力的协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(18): 59-68.
- ZHAN Jin, CHEN Bo, XIONG Yongxin, et al. Coordinated control for improving the HVRT capability of a DFIG wind farm using a synchronous condenser[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(18): 59-68.
- [8] 赵红阳, 叶荣, 王秀丽, 等. 计及风电汇集系统静态电压稳定性的网储联合规划[J]. *智慧电力*, 2021, 49(5): 15-20.
- ZHAO Hongyang, YE Rong, WANG Xiuli, et al. Coordinated planning of transmission network and energy storage systems considering static voltage stability of wind integration system[J]. *Smart Power*, 2021, 49(5): 15-20.
- [9] 孙晓艳, 高阳, 彭力. 计及损耗的双馈感应风力发电机高电压穿越控制策略[J]. *智慧电力*, 2020, 48(12): 33-39.
- SUN Xiaoyan, GAO Yang, PENG Li. High voltage ride through control strategy for doubly-fed induction generator considering loss[J]. *Smart Power*, 2020, 48(12): 33-39.
- [10] 张雪娟, 束洪春, 孙士云, 等. 双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(2): 18-29.
- ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 18-29.
- [11] 刘其辉, 毛未, 高瑜. 提升无功调节能力的双馈式风力发电机转速变模式控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9): 85-92.
- LIU Qihui, MAO Wei, GAO Yu. Speed change mode control strategy of doubly-fed wind turbine to improve reactive power regulation ability[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9): 85-92.
- [12] GUCHHAIT P K, BANERJEE A. Stability enhancement of wind energy integrated hybrid system with the help of static synchronous compensator and symbiosis organisms search algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 138-150.
- [13] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(19): 16-23.
- LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. New reactive power compensation and voltage control scheme for doubly-fed wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(19): 16-23.
- [14] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(12): 1-6.
- YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinated control strategy of reactive power and voltage for doubly-fed wind farms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12): 1-6.
- [15] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, RODRIGUEZ AMENEDO J L. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators[J]. *Electric Power Systems Resources*, 2008, 78(11): 1837-1840.
- [16] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 77-82.
- LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control strategy of doubly-fed wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(9): 77-82.
- [17] XU Dianguo, LI Rui, LIU Yichang, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[C] // 13th European Conference on Power Electronics and Application, 2009, Barcelona, Spain: 1-10.

- [18] 赵晶晶, 徐成斯, 洪婉莎, 等. 变风速下双馈异步风机在微电网中的电压频率协调控制[J]. 可再生能源, 2017, 35(8): 1195-1202.
ZHAO Jingjing, XU Chengsi, HONG Wansha, et al. Voltage and frequency coordinated control of doubly-fed asynchronous fan in microgrid under variable wind speed[J]. Renewable Energy, 2017, 35(8): 1195-1202.
- [19] 黄弘扬, 王波, 黄晓明, 等. 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 140-147.
HUANG Hongyang, WANG Bo, HUANG Xiaoming, et al. Distributed dynamic reactive power support system based on doubly-fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 140-147.
- [20] 符杨, 潘翔龙, 黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2168-2173.
FU Yang, PAN Xianglong, HUANG Lingling. Reactive power optimization of offshore wind farms considering the reactive power regulation capability of doubly-fed units[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2168-2173.
- [21] 甄真. 包头地区含风电场电力系统的无功优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHEN Zhen. Research on reactive power optimization of power system containing wind farms in Baotou area[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [22] 刘志武. 分散式风电场提高电压合格率的无功控制方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
LIU Zhiwu. Research on reactive power control method for decentralized wind farms to improve voltage qualification rate[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [23] 程晓磊. 基于风机无功支持能力的风电场无功控制策略研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
CHEN Xiaolei. Research on wind farm reactive power control strategy based on wind turbine reactive power support capability[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [24] OUYANG J, TANG T, YAO J, et al. Active voltage control for DFIG-based wind farm integrated power system by coordinating active and reactive powers under wind speed variations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1504-1511.
- [25] GHOSH S, ISBEIH Y J, BHATTARAI R, et al. A dynamic coordination control architecture for reactive power capability enhancement of the DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3051-3064.
- [26] 曹军, 张榕林, 林国庆, 等. 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 87-91.
CAO Jun, ZHANG Ronglin, LIN Guoqing, et al. Variable-speed constant-frequency doubly-fed wind farm voltage control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 87-91.
- [27] ESHKAFTAKI A A, RABIEE A, KARGAR A, et al. An applicable method to improve transient and dynamic performance of power system equipped with DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2351-2361.
- [28] 张金龙. 双馈风电机组模型参数辨识与模型验证[D]. 济南: 山东大学, 2012.
ZHANG Jinlong. Model parameter identification and model verification of doubly-fed wind turbines[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [29] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用及软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [30] 王佳荣. 自抗扰控制器的参数优化及其应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WANG Jiarong. Research on parameter optimization and application of active disturbance rejection controller[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [31] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-07-31

作者简介:

崔森(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源电力变换技术; E-mail: cuisen@ncepu.edu.cn

颜湘武(1965—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能等技术; E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn

李锐博(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为风电机组控制技术。E-mail: liruibob@ncepu.edu.cn

(编辑 周金梅)