计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制

孙伟伟 1.2. 付 蓉1. 陈永华 2

(1. 南京邮电大学 自动化学院,江苏 南京 210046;

2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司,江苏南京 210003)

摘要:针对双馈风电场的无功补偿能力和电压稳定问题,提出考虑双馈风电场无功裕度的无功电压控制方案。该方案以双馈风电机组为主要补偿设备,以静止无功补偿器作为辅助无功补偿设备,并引入风电场风功率预测,优化计算未来一个时段内的无功补偿优化参考值。在 MATLAB/Simulink 中建立双馈风电场模型,连接无穷大电网,采用粒子群优化算法优化出风电场无功补偿参考值。仿真结果表明,风电机组按照该无功优化参考值进行无功输出,可留有更大的无功裕度,增强了风电场无功调节能力,并且满足电压要求,提高了风电场的电压稳定性,同时双馈发电机组无需连续无功调节。

关键词:风电场;无功裕度;补偿;电压控制;粒子群优化算法;协调控制;预测;优化

中图分类号: TM 614 文献标识码: A

0 引言

随着风电接入容量的不断增大,风电的波动性 和随机性特点给风电并网发电带来很多不利的影 响^[1-3],其中并网点电压的波动尤为突出。因此,为了 风电场的安全稳定运行,必须对无功和电压进行合理 管理。而双馈型风电场因其有变频器与电网连接, 具备动态无功能力^[4-5],逐渐成为主流。

文献[6]说明了无功与电压的关系及在电压控制中的应用。文献[7]提出了协调控制的基本无功分配分层原则,无功整定后,先在补偿装置和风电场间分配,再在各发电机组间分配,最后是发电机组内变流器间的无功分配。文献[8]提出了故障时刻的双馈风电场无功电压控制策略。而无功优化往往是实现电网经济调度、提高电能质量、系统安全稳定运行的重要手段^[9]。由于风电场并网点电压波动更为严重,针对风电场的无功优化也就更为重要。文献[10]提出了基于电压稳定灵敏度的风电场无功优化方法,以无功设备投资和系统有功网损的综合费用为目标函数。文献[11]和[12]分别提出基于改进遗传算法和改进粒子群优化(PSO)算法的风电场多目标无功优化,以有功网损最小、负荷节点电压偏移量最小及静态电压裕度最大为多目标进行优化。

由于风电场接入电网技术规定明确要求应首先 充分利用风电机组的无功容量,且双馈风电机组的 无功补偿能力是一定的,相同情况下,使用的无功能 力越少,可再调节的无功范围就越大。所以本文考 虑无功优化与风电场的无功电压控制相结合,在风 电场安全稳定运行及首先利用风电机组无功容量的 前提下,使风电机组留有更多的无功裕度为出发点,

收稿日期:2013-08-14;修回日期:2014-07-26

采用 PSO 算法对双馈风电场无功补偿值进行优化, 使风电机组无需连续调节,实现风机和静止无功补偿

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.013

1 风电场无功裕度及模型处理

1.1 风电场无功裕度

器(SVC)的协调控制。

以风电场无功裕度 K 来衡量风电场的无功调节 能力^[13],如式(1)所示。

$$K = \begin{cases} \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{f}}}{Q_{\text{max}}} \times 100 \% & Q_{\text{f}} \ge 0 \\ \frac{Q_{\text{min}} - Q_{\text{f}}}{Q_{\text{min}}} \times 100 \% & Q_{\text{f}} < 0 \end{cases}$$
(1)

其中,Q_f为当前风电场发出的无功功率;Q_{max},Q_{min}分别为风电场无功容量的极大值和极小值。

可以看出,由于在一定风电场有功输出条件下, 风电场的无功容量是不变的,所以要想增加风电场的 无功裕度,只能减小风电场当前发出的无功功率 Q_r。 而风电场无功裕度 K 越大,表明当前风电场的运行 状态与风电场的无功极限距离越远,无功调节能力 越大。

1.2 风电场模型处理

双馈风电场的建模因考虑的因素及侧重点不同 而模型有所区别,所以针对不同应用场景,取用相应 的模型会简化工作量。本文只涉及风电场出口母线 电压的无功补偿优化,不涉及风电场内部风机连接方 式、位置的区别,因而采用风电场集总模型,即将风电 场中所有风电机组等效为一台风电机组模型^[14-15](该 模型无需对每台风电机组进行单独建模,可减少风 电场建模的工作量)。该模型的前提是假设风电场中 所有风电机组为同一型号,工况相同,且都运行在相 同的风速条件下。若风电场由N台型号相同的双馈 感应风电机组组成,各风电机组定子端并联后经变 压器接入电网,则风电场输出的有功与无功分别为1 台风电机组的有功与无功的 N 倍。

$$P_{\rm W} = N P_{\rm G} \tag{2}$$

$$Q_{\rm W} = N Q_{\rm G} \tag{3}$$

其中, P_w 、 Q_w 分别为风电场输出的有功与无功; P_G 、 Q_c 分别为1台风电机组的有功和无功。

2 无功电压协调控制思路

无功电压协调控制基本思路:根据风功率预测, 为风电机组预先提供未来一段时间内无功输出参考 值,该无功参考值一方面尽可能有助于电压接近目 标电压,另一方面尽量小,以使风电机组留有较大无 功裕度。其过程如下:先引入短期风功率预测,对短 期风功率预测进行时段划分,在一时段内取数个时 刻点的风功率,对应时刻点进行潮流计算,得出相应 时刻点的出口点电压值;再把这些电压值输入 PSO 算法程序按照目标函数进行优化,得出未来该时段 内最优的无功补偿参考值;风电机组按此无功参考 值进行无功输出,SVC 再根据实时风电场出口电压 值和死区要求确定是否动作,若满足要求则 SVC 不 动作,若不满足要求则 SVC 根据风电场出口电压差 值进行无功补偿,直到该时段结束。

3 无功优化模型

3.1 目标函数

根据协调控制思路,设置目标函数如下:

目标1 时段内风电场出口实际电压与目标电 压之差累计和最小。

$$F_{1} = \min \sum_{i=1}^{n} |U_{Wi} - U_{Wset}|$$
(4)

目标 2 风电场出口处无功补偿量最小。

$$F_2 = \min |Q_{\rm f}| \tag{5}$$

其中, U_{Wi} 为时刻*i*的风电场出口电压;n为时段内所 取时刻数; U_{Wset} 为时段内目标电压设定值; Q_{f} 为风电 场无功补偿值。

3.2 约束条件

a. 等式约束。

电力系统的优化中,等式约束一般为潮流约束 方程,即有功平衡与无功平衡,见式(6)、式(7)。

$$P_i + P_{Wi} = P_{fi} + U_i \sum_{j=1}^{N_*} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$
(6)

$$Q_i + Q_{Wi} = Q_{ii} + U_i \sum_{j=1}^{N_a} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$
(7)

其中, P_i 和 Q_i 分别为电网输入节点*i*的有功功率和 无功功率; P_{wi} 和 Q_{wi} 分别为风电场向节点*i*注入的 有功功率和无功功率; P_i 和 Q_i 分别为节点*i*处负荷 的有功功率和无功功率; N_n 为节点总数; U_i 、 U_j 分别 为节点*i*、*j*的电压; G_{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。

b.不等式约束。

不等式约束包括状态变量约束和控制变量约 束。本文不考虑变压器调节,只调节风电机组无功 补偿量,所以状态变量约束为式(8),控制变量约束 为式(9):

$$U_{\rm imin} \leqslant U_i \leqslant U_{\rm imax} \tag{8}$$

$$Q_{\min} \leqslant Q \leqslant Q_{\max} \tag{9}$$

其中, U_{imax}、U_{imin}分别为节点 i 电压上、下限; Q 为风电 机组的无功补偿量; Q_{max}、Q_{min}分别为所有风电机组无 功补偿容量上限之和、下限之和。

由于风电机组的无功能力是随着风电场输出功 率变化而变化的,在最大风功率输出时,风电机组无 功能力最小。为使在时段内风电机组的实际无功能 力都能满足所求得无功参考值要求,这里 Q_{max},Q_{min} 分 别取所有风电机组最大风功率输出时的无功上限之 和及下限之和。

3.3 多目标优化处理

在多目标优化处理中,使多个目标同时达到最 优是不可能的,且彼此间量纲不同,相互之间不可直 接对比。模糊化可使目标值转化为无量纲值,再给 不同目标函数分配合适的权重,使多目标函数转化 为单目标优化^[16]。此处涉及2个目标函数,一个是 电压关系函数,另一个是无功关系函数。本文对电 压、无功等都进行标幺化,再对两目标函数进行权 重分配,适应度函数为:

$$F = \min\left(\lambda_{1\sum_{i=1}^{n}} \left| U_{Wi} - U_{Wiset} \right| + \lambda_{2} \left| Q_{f} \right| \right)$$
(10)

其中, λ_1 和 λ_2 为权重系数。

4 PSO 算法求解无功参考值

PSO 算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来 的一种基于群体协作的随机搜索算法。由于 PSO 算 法本身具有概念简单、收敛迅速等特点,在电力无功 优化中得到了应用,并取得了一些成果^[17-19]。计及无 功裕度的双馈风电场无功优化算法流程如下。

a. 优化模型中输入预测风功率参数,算法中输入优化模型有关不等式约束量的上下限等。

b. 设定粒子群规模、最大迭代次数、惯性权重系数和学习因子,对粒子更新速度进行限制,超出时设为极值,以双馈风机无功输出为控制变量进行编码。由于控制量仅为1个,所以粒子的维数设为1维。

c. 设定风电场初始无功输入为 0,对优化模型进行潮流计算,根据所取时间节点,得到相应时刻风电场出口电压值 U_{wi}。同时风电场出口电压目标值假定为 1。

d. 调用模型潮流计算所取时刻风电场出口电压

82

值,编写目标函数。

e.随机初始化粒子群,得到 M 个可行解,将初 始粒子值代入目标函数,求得每个粒子的适应度值 $f_i = F(x)$ 。将每个粒子当前位置作为粒子当前最优解 $p_{\text{best}}(i) = f_i, g_{\text{best}} = \min f_i$ 为群体当前最优解。

f. 对每个粒子的位置和速度进行更新。更新后的粒子代入目标函数,重新进行潮流计算,得到新的适应值。如果粒子i的适应值优于 $p_{\text{best}}(i)$,则将其值设立为新的 $p_{\text{best}}(i)$ 。如果最优的 $p_{\text{best}}(i)$ 优于 g_{best} ,同样将其值设立为新的 g_{best} 。

g. 如果迭代次数达到最大次数,则结束优化计算,否则返回步骤 e。

5 算例分析

本文使用 MATLAB/Simulink 软件搭建,模拟某 实际在建风电场,该风电场目前由 36 台 1.5 MW 风机 组成,总共 54 MW 装机容量。把风电场等值为一台 风电机组,经过机端变压器升到 6 kV 集电系统,经电 缆连接至风电场主变 T₁ 低压侧、主变升压到 35 kV, 经 30 km 电缆与变压器 T₂ 连接,升压至 110 kV 系统 电压,在主变高压侧带一个 2 MW 的本地负荷。系统 结构图如图 1 所示,仿真系统电压控制点为母线 2, 风机采用最大风能追踪控制。



取短期风功率预测曲线进行时段划分,划分时 段间隔不宜太大也不宜太小。若太大,就风电机组 进行补偿很难保证在这么长时段内多数时刻风电场 出口电压都满足要求,精度不高,多数时间需要 SVC 进行补偿;若太小,精度高,但优化的实际作用效果 会大打折扣。所以本文以取 20 min 为例,风功率预 测曲线如图 2 所示。在其上取时刻点,如每 2 min 取 一个点,通过潮流计算得出风电场出口电压值并代 入算法进行优化。





为 30,为突出无功裕度,权重系数 λ_1 和 λ_2 分别设为 0.4 和 0.6。目标函数值和控制变量值优化过程分别 如图 3 和图 4 所示。算法优化迭代到 17 次时,得到 最优值。控制变量也即无功补偿值最终为 0.041(标 幺值),此值即作为未来一时段内风电场无功补偿的 参考值。



Fig.4 Iterative process of control variable optimization

如图 5 中所示, Uw 为补偿前风电场出口电压标幺值, U'w 为风电场采用自动电压控制后风电场出口电压标幺值(同样风电机组为首要无功源和 SVC 协调控制), U'w 为风电机组按优化值进行补偿后风电场出口电压标幺值。对比 U'w 与 U'w 可以看出, 在该时段内风电场按无功优化参考值进行补偿时, 电压提升不如自动电压控制方式, 但相比补偿前电压 Uw 提升很多。



图 5 补偿前后及自动电压控制风电场出口电压 Fig.5 Output voltage of wind farm, with automatic voltage control, with compensation or without compensation

图 6 为采用自动电压控制时风电场所需无功补 偿量(标幺值)。可见,自动电压方式下其无功补偿量 大部分时间为 0.05 p.u. 左右,且在某些时间段达到了 0.1 p.u.,明显高于优化方式无功参考值 0.041 p.u.。

通过对2种电压控制方式的风电场出口电压和 无功补偿量的比较可以发现,自动电压方式以风电 场出口电压为唯一控制目标,电压提升多,无功补偿 量也大,而本文优化控制方式兼顾目标电压和无功





补偿量的共同效果,电压得到一定提升,无功补偿量 明显减小。

如果电压要求为 0.97~1.03 p.u.,则优化方式下 的风电场出口电压满足其要求,SVC 不动作。而风电 机组提供的无功量减少了,所以优化补偿方式在提 高风电场出口电压稳定性的基础上,增加了风电场 的无功裕度,提高了无功调节能力。如果电压要求为 0.98~1.02 p.u.,则有时刻不满足,SVC 检测到电压超 出该范围,则按照电压差方式进行无功补偿,直到该 时段结束,补偿效果如图 7 所示。图中,U^W 为 SVC 补偿后的风电场出口电压标幺值,SVC 在低于电压 0.98 p.u. 时开始输出无功,补偿后使电压满足要求。



Fig.7 Output voltage of wind farm with SVC compensation

6 结论

本文针对双馈风电场可以作为无功源的特性, 在风电机组作为首要无功补偿源、SVC 作为辅助无 功源基础上,强调双馈风电机组的无功裕度,以此为 目的进行了无功电压控制的研究。在引入风功率预 测的基础上,通过对实际系统仿真分析表明,优化结 果可以为未来一时段内风电机组提供无功补偿参考 值。按此协调控制方案,提升了风电机组的无功裕 度,也进一步稳定了风电场出口电压。

参考文献:

- [1] 段建东,杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈风电场的配电网无 功优化[J]. 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 wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):123-127.
- [2] 袁晓冬,丘志鹏,李群,等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率 调节控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):16-19.

YUAN Xiaodong,QIU Zhipeng,LI Qun,et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):16-19.

- [3] AZMY A M,ERLICH I. Impact of distributed generation on the stability of electrical power system[C]//Proceedings of 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco,CA, USA:IEEE,2005:1056-1063.
- [4] 贺益康,郑康,潘再平,等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究
 [J]. 电力系统自动化,2004,28(13):55-60.
 HE Yikang,ZHENG Kang,PAN Zaiping, et al. Investigation on an AC excited variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2004, 28(13):55-60.
- [5] DATTA R,RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine; a comparison with alternative schemes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3):414-421.
- [6] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004,29(3):377-392.
- [7] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略
 [J]. 电力系统自动化,2009,33(13):83-88.
 WANG Songyan,ZHU Lingzhi,CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems,2009, 33(13):83-88.
- [8] 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[J].电力自动化设备,2011,31(9):14-17.
 WANG Chenfu,LIANG Jun,FENG Jiangxia, et al. Coordinated var-voltage control during fault of wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):14-17.
- [9] 许文超,郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(1):100-104. XU Wenchao,GUO Wei. Summarize of reactive power optimization model and algorithm in electric power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2003,15(1):100-104.
- [10] 王振宇,李娟,苏志扬. 基于电压稳定灵敏度的风电场无功优化研究[J]. 华中电力,2011,24(2):23-26.
 WANG Zhenyu,LI Juan,SU Zhiyang. Study on reactive power optimization of wind farm based on voltage stability sensitivity
 [J]. Central China Electric Power,2011,24(2):23-26.

[11] 赵亮,吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):84-88.
ZHAO Liang,LÜ Jianhong. Multi-objective optimal compensation of reactive power for wind farms based on improved genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30 (10):84-88.

- [12] 刘述奎,李奇,陈维荣,等.改进粒子群优化算法在电力系统多 目标无功优化中应用[J].电力自动化设备,2009,29(11):31-36. LIU Shukui,LI Qi,CHEN Weirong,et al. Multiobjective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29 (11):31-36.
- [13] 栗然,唐凡,刘英培,等.双馈电机风电场等裕度无功分配策略[J].中国电力,2011,44(8):57-61.

84

LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Reactive power distribution in equivalent margin of a wind farm with doubly fed induction generators[J]. Electric Power, 2011, 44(8): 57-61.

 [14] 苏勋文,米增强,王毅.风电场常用等值方法的适用性及其改进 研究[J].电网技术,2010,34(6):175-180.
 SU Xunwen,MI Zengqiang,WANG Yi. Applicability and improvement of common-used equivalent methods for wind farms

[J]. Power System Technology,2010,34(6):175-180.

[15]曹张洁,向荣,谭谨,等.大规模并网型风电场等值建模研究现状[J].电网与清洁能源,2011,27(2):56-60.

CAO Zhangjie,XIANG Rong,TAN Jin, et al. Review of current research on equivalent modeling of large-scale grid-connected wind farm[J]. Power System and Clean Energy,2011,27(2): 56-60.

[16] 陈海焱,陈金富,段献忠.风电机组的配网无功优化[J].中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.

CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Reactive optimization in distribution system with wind power generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7):40-45.

[17] 姜惠兰,陈平,王敬朋,等. 改进粒子群算法在电网无功优化中的应用[J]. 中国电力,2011,44(12):11-15.

JIANG Huilan, CHEN Ping, WANG Jingpeng, et al. Improved

particle swarm algorithm in the application of the power grid reactive power optimization [J]. Electric Power, 2011, 44(12): 11-15.

- [18] KENNEDY J,EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]//Proceeding of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Orlando, FL, USA: IEEE, 1997:4104-4108.
- [19] 赵波,曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J].
 中国电机工程学报,2005,25(5):1-7.
 ZHAO Bo,CAO Yijia. A multi-agent particle swarm optimiza

tion algorithm for reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5):1-7.

作者简介:



孙伟伟(1990—),男,江苏盐城人,硕士 研究生,主要研究方向为风电场发电与控制 (E-mail:sundouwei_607@126.com);

付 蓉(1974—),女,江苏丹阳人,副教 授,博士后,主要从事智能电网、电气控制技 术、复杂网络控制等方面的教学和科研工作; 陈永华(1979—),男,湖南临湘人,工程

孙伟伟

师,主要研究方向为电力系统安全稳定控制。

Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin

SUN Weiwei^{1,2}, FU Rong¹, CHEN Yonghua²

(1. College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute/Nanjing Nari Group Corporation, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the reactive power compensation ability and voltage stability of doubly-fed wind farm, a scheme of coordinated var and voltage control considering the reactive power margin is proposed, which takes the doubly-fed wind turbine as the main compensation device and the static var compensator as the auxiliary one. The wind power forecast is used to calculate the optimal var compensation reference of the following short period. A model of doubly-fed wind farm connected to an infinite system is built with MATLAB/Simulink and the optimal var compensation reference is calculated with the particle swarm optimization algorithm. The simulative result shows that, the wind farm outputting the reactive power according to the optimal reference may maintain a larger reactive power margin, improve the reactive power regulation ability, satisfy the voltage requirement, enhance the voltage stability and avoid the continuous reactive power regulation.

Key words: wind farms; reactive power margin; compensation; voltage control; particle swarm optimization algorithm; coordinated control; forecasting; optimization