

基于本地模式的DFIG风电场 无功控制策略

杜兴伟¹, 闫帅榜², 王娟², 崔金兰², 李武龙³

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450018;

2. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450000;

3. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对目前风电场无功调节能力不足现状, 提出了一种基于本地模式DFIG无功控制策略。针对根据DFIG定转子电流和静态稳定极限确定了DFIG的无功输出极限, 从直流电压波动角度得到二者之间的优先级。在风电场无功电压损耗计算的基础上, 给出了基于定子电压和输出功率的无功给定参考函数的本地模式无功控制策略。通过DIgSILENT/Power Factory算例对比了机组单位功率因数运行和本地模式DFIG无功控制策略运行方式的结果, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 双馈异步发电机; 网侧变流器; 无功控制; 功率因数调整; DIgSILENT/Power Factory

中图分类号: TM28

文献标识码: A

DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd19589

Local Mode DFIG Wind Farm Reactive Power Control Strategy

DU Xingwei¹, YAN Shuaibang², WANG Juan², CUI Jinlan², LI Wulong³

(1. State Grid Henan Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450018, Henan, China;

2. State Grid Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450000, Henan, China;

3. Beijing Zhongheng Borui Digital Electric Technology Company, Beijing 100085, China)

Abstract: For solving wind farm reactive power weak regulation ability, a local mode DFIG reactive power control strategy was proposed. DFIG reactive power capacity limit was deduced from rotor and stator current as well as steady stability limit, and the priority of DFIG grid side converter and stator reactive power generation was given on the basis of DC link voltage fluctuation. According to wind farm reactive power loss calculation results, a local mode reactive power control strategy was proposed. Both constant power factor and wind farm local reactive power control strategy were simulated by DIgSILENT/Power Factory, which verify the effectiveness of local mode reactive power control strategy.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); grid side converter (GSC); reactive power control; power factor regulation; DIgSILENT/Power Factory

由于我国能源负荷分布所呈现的逆空间分布特性, 大规模新能源汇集特高压送出方式输送至负荷中心的方式较为普遍^[1]。但针对风电出力波动性较大的特点, 汇集系统的运行状态变化较大, 特别是由于无功损耗变化引起的系统电压波动对于含风电的电力系统稳定性造成较大影响。目前的风电并网标准中, 均要求风电场具有一定

的无功调节能力, 保证系统的电压稳定性。目前广泛应用的双馈异步发电机组(DFIG)具备机端功率可调、运行范围宽的特点。由于早期风电渗透率较低、汇集线路长度较短, 对于风电场无功调节能力需求相对较低, 所以国内大部分风电场该型机组运行在恒定功率因数模式。

风电场自动电压控制(automatic voltage con-

rol, AVC)大部分保持机组单位功率因数运行,对公共连接点(point of common coupling, PCC)的静态无功补偿器(static voltage compensator, SVC)等无功补偿设备进行调节,从而保证电压处于标准范围内^[2]。文献[3]提出的风电场AVC系统则利用了DFIG无功可调特性,根据系统运行状态和机组运行状态对机组无功进行分配,并指出风电场无功调节本地模式亦为可行方式;文献[4]针对大型风电基地的无功控制策略考虑了电压/灵敏度信息对风电机组无功进行调整,该方法基于PCC点电压;文献[5]采用的无功分层控制方案,采用PCC电压偏移量作为标准调整机组运行功率因数。但上述方法均依赖风场AVC系统和机组之间通讯,同时对于定子侧和网侧变流器输出无功均可调的DFIG机组没有确定无功控制的优先级。由于每台风机控制器可以获得输出功率和机端电压全部信息,采用就地信息的风电场本地模式无功调节控制策略可以有效节省机组之间通讯设备并充分发挥DFIG无功调节能力。

本文从降低工程投资和发挥DFIG无功调节能力的角度出发,首先分析了DFIG无功调节能力和网侧变流器(GSC)与定子侧无功调节的优先级。在风电汇集系统无功损耗基础上,确定本地模式DFIG无功调节的P-Q曲线,电气测量来自于风电机组采集的定子侧电压和有功功率输出,无需与风电场AVC系统进行通讯。利用DIg-SILENT/Power Factory搭建的风电汇集系统,对比了机组单位功率因数运行方案和本文的本地DFIG无功控制策略2种运行方式的结果,验证了所提控制策略的有效性。

1 DFIG 无功特性

图1为双馈异步电机静态等效电路。

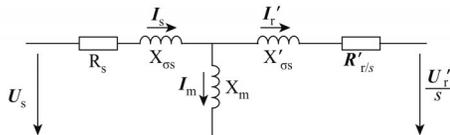


图1 双馈异步电机静态等效电路

Fig.1 DFIG static equivalent circuit

对于Ⅲ型DFIG机组,采用如图1所示的折算至定子侧静态等效电路进行分析,其数学模型为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + jX_{os} I_s + jX_m I_m \\ \frac{U'_r}{s} = -\frac{R'_r}{s} I'_r - jX'_{or} I'_r + jX_m I_m \\ I_s = I'_r + I_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_s, U'_r 分别为定子电压有效值和折算后转子电压有效值; I_s, I'_r 分别为流入定子侧电流有效值和折算后流入转子侧电流有效值; s 为转差率; X_{os}, X'_{or}, X_m 分别为定子侧漏感、折算后转子侧漏感、励磁电感; R_s, R'_r 为定子侧电阻和折算后转子侧电阻。

对于DFIG网侧变流器控制目标为直流母线电压和变流器 q 轴电流,转子侧变流器控制目标为机侧输出有功无功。考虑到DFIG的无功输出能力时,当定子侧无功输出变化 ΔQ_s 时,在采用定子电压矢量定位即 $U_q=0$ 时,转子电流和定子功率关系如下式:

$$I'_r = \frac{(P_s X_s - Q_s R_s) + j(3U_s^2 - P_s R_s - Q_s X_s)}{3X_m U_s} \quad (2)$$

式中: X_s 为定子侧等效电抗,数值为定子侧漏抗和励磁电抗之和。

当转子电流存在极限 I'_{rmax} 时,化简为

$$\left(P_s - \frac{3U_s^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2}\right)^2 + \left(Q_s - \frac{3U_s^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2}\right)^2 \leq \frac{(3X_m U_s I'_{rmax})^2}{R_s^2 + X_s^2} \quad (3)$$

考虑定子电流极限 I_{smax} 时,有:

$$P_s^2 + Q_s^2 \leq (3U_s I_{smax})^2 \quad (4)$$

用同步机等值的发电机功角 δ 可以将定子有功功率和无功功率分别表示为以下形式:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3U_s^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} + \frac{3X_m U_s I'_{rmax}}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \sin\delta \\ Q_s = \frac{3U_s^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} + \frac{3X_m U_s I'_{rmax}}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \cos\delta \end{cases} \quad (5)$$

发出功率时,忽略定子电阻有近似 $\delta \in (\pi, 2\pi)$ 时,处于静态稳定区域则要求 $\delta \in (\pi, 1.5\pi)$,故有静态稳定极限^[6]:

$$Q_s \leq \frac{3U_s^2 X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (6)$$

综合上述限制,当1.67 MW双馈异步电机参数为:额定容量1.67 MV·A,定子漏感0.155 mH,线电压0.69 kV,转子漏感0.142 mH,定子电阻0.002 Ω ,励磁互感2.64 mH,转子电阻0.003 Ω ,得到机组功率运行区间如图2所示。

由图2可知,在定、转子电流和静态稳定共同限制下,DFIG功率运行区间如图阴影部分所示,可以发现机组的有功出力上升会使得无功调节区间减小,同时无功吸收能力受静态稳定限制存在最大值。

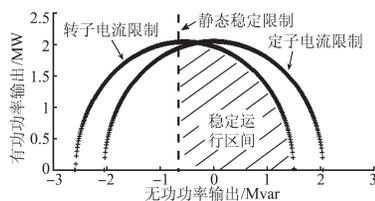


图2 双馈异步电机输出功率区间

Fig.2 DFIG static power output range

对于Ⅲ型风力发电机组,其定子侧和网侧变流器无功功率均可调,网侧变流器容量较小,一般为机组容量的30%左右。电网电压波动时,网侧变流器和定子侧无功输出调用的优先级别对于机组的直流电压输出有较大影响,这里首先分析定子侧无功输出对于转子侧有功输出的影响。仅仅改变定子无功功率输出,定子侧输出有功维持恒定,转子侧电流和电压变量有^[7]:

$$\Delta I_r' = \frac{(R_s - jX_s)}{3X_m U_s} \Delta Q_s \quad (7)$$

$$\Delta U_r' = \frac{k_2 + jk_1}{3U_s} \Delta Q_s \quad (8)$$

其中

$$k_1 = (R_r' X_s + sR_s X_r') / X_m$$

$$k_2 = (R_r' R_s - sX_{\sigma r}' X_s - sX_{\sigma s} X_m) / X_m$$

当定子无功功率变化 ΔQ_s 时,转子吸收有功功率变化为

$$\begin{aligned} \Delta P_r' &= 3\text{Re}[\Delta U_r' \Delta I_r'^*] \\ &= \frac{(sR_s X_m^2 + R_r' R_s^2 + R_r' X_m^2)}{3X_m^2 U_s^2} \Delta Q_s^2 \quad (9) \end{aligned}$$

由于DFIG背靠背变流器两侧无功解耦,直流两侧只交换有功功率,当忽略定子电阻时,由式(9)可得:

$$\begin{aligned} \Delta P_r' &= 3\text{Re}[\Delta U_r' \Delta I_r'^*] \\ &\approx \frac{R_r' X_m^2}{3X_m^2 U_s^2} \Delta Q_s^2 \\ &= \frac{R_r'}{3U_s^2} \Delta Q_s^2 \quad (10) \end{aligned}$$

由于转子电阻数值较小,所以该项数值趋近于0,可得定子侧无功功率输出对于转子侧有功影响很小,从而对直流母线的电压不会造成较大波动。而网侧变流器输出无功对直流母线电压影响较大,调整过程中动态特性复杂并可能引起功率剧烈波动,所以DFIG机组的无功调用级别定子侧高于网侧变流器。

2 DFIG无功控制策略

2.1 风电汇集系统无功损耗分析

风电场除去风电机组之外,内部电气设备主

要包含机端0.69 kV/35 kV箱式升压变压器、汇集线路、汇集升压变和送出线路^[8-9]。依照变压器模型计算变压器的运行无功损耗,有变压器电抗:

$$X_T = \frac{U_T^2}{S_T} \times \frac{U_k \%}{100} \quad (11)$$

式中: U_T, S_T 分别为变压器原边侧额定电压和容量; $U_k\%$ 为短路电压百分数。

变压器整体损耗:

$$\Delta Q_T = \frac{P^2 + Q^2}{u_T^2} X_T + \frac{I_0 \%}{100} \times S_T \quad (12)$$

式中: P, Q 分别为变压器传输有功功率和无功功率; u_T 为一次侧实际电压; $I_0\%$ 为空载电流百分数。

对于风电场汇集和集中送出线路,其无功损耗分为近似不变的容性无功损耗和变化的感性无功损耗,其近似表达式为

$$\Delta Q_L = \frac{(P_L^2 + Q_L^2)}{U_L^2} X_L - U_L^2 B_L \quad (13)$$

式中: U_L 为线路电压有效值; X_L 为线路感抗; P_L, Q_L 分别为线路输送有功功率和无功功率; B_L 为线路导纳。

典型的某100 MW风电场不同运行电压下无功损耗—有功功率特性如图3所示,当传输功率较低时,线路和变压器感性无功损耗较小,不平衡无功主要来自于线路充电功率和变压器空载损耗;传输功率较大时,线路和变压器无功损耗较大。

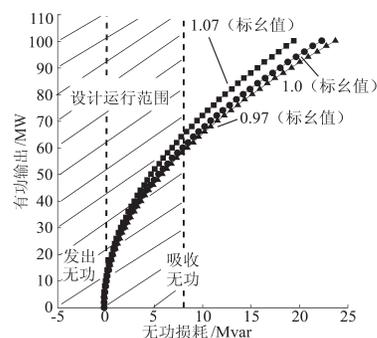


图3 风电场不同输入功率下无功损耗

Fig.3 Reactive power loss with different power output of wind farm

2.2 DFIG本地模式无功控制策略

按照是否主动参与电网调度子站AVC,风电场AVC可分为联网模式和本地模式2种^[10],本文所设计的DFIG本地模式无功控制策略,就是根据GSC采集的定子侧电压和有功出力给定信号(通常由风速测量数据计算得到),按照设定的P-Q运行曲线调整风电机组的无功功率输出。本地模式的DFIG风电场无功控制策略整体流程如图4所示。

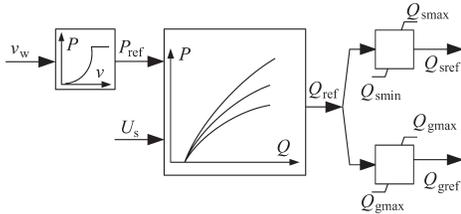


图4 本地模式DFIG无功调节策略

Fig.4 Local mode DFIG reactive power control strategy

根据实时风速 v_w 计算风电机组的参考输出有功功率 P_{ref} ，联合定子电压 U_s 计算计算机组的参考无功给定 Q_{ref} 。当 Q_{ref} 在定子输出无功极限内时，优先调节定子无功出力 Q_{sref} ；当机组参考无功 Q_{ref} 超出定子输出无功范围 (Q_{smin}, Q_{smax}) 时，定子无功出力至 Q_{smax} ，网侧变流器 GSC 输出无功功率 Q_{gref} ；网侧变流器输出超出范围 (Q_{gmin}, Q_{gmax})，则该机组达到无功调节极限。

采用所述本地模式 DFIG 无功控制策略中，无功给定参考值的选取较为关键，本文选取的给定值参考函数表达式为

$$Q_{ref} = -\text{sgn}(\Delta U) \cdot K \cdot (\Delta U)^2 \cdot P_{WF} \quad (14)$$

式中： sgn 为符号函数，定义无功正方向为向电网输送无功功率； ΔU 为电压偏差； P_{WF} 为当前风电场输送有功功率； K 为无功参考给定系数。

对于风电汇集系统，按照式(11)~式(13)得到不同有功功率输送下无功损耗，从而确定系数 K 。以图3风电场为例，电压1.0(标么值)下输送额定有功功率时无功损耗约为0.225(标么值)，可取系数 K 为25，得到的无功功率参考值 Q_{ref} 曲面和输出有功 P 及电压偏移 ΔU 如图5所示，当输出功率和电压偏移较大时，无功给定参考值较大。当无功给定值大于式(3)、式(4)、式(6)所决定的DFIG无功输出极限时，按照极限值给定输出无功功率给定。

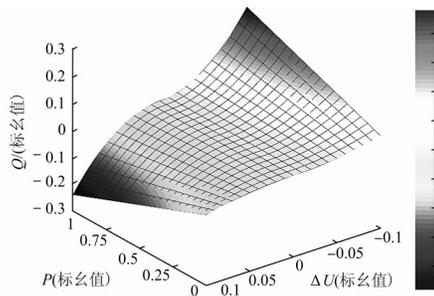


图5 无功给定参考值给定曲面

Fig.5 Reactive power reference value curved surface

3 算例分析

以某风电场汇集系统为例，系统如图6所示，风电群1~风电群3均有20台1.67 MW III型变速风电机组，分别通过0.5 km, 2 km, 0.75 km线路汇集至汇集点。汇集点通过35 kV/220 kV升压变实现汇集升压，再通过25 km的220 kV线路送出至220 kV/500 kV升压变集中送出。

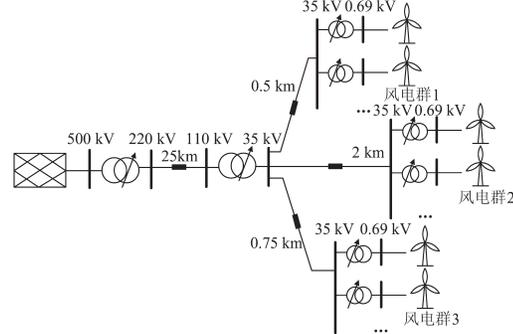


图6 风电汇集送出系统

Fig.6 Wind energy collection and transmission system

比较风电场采用单位功率因数运行和本文所提出的本地模式DFIG无功控制策略运行结果，在DIGSILENT/Power Factory中构建系统模型，该软件可以进行短期和中长期暂态仿真，且提供多种新能源模型。方法2按照式(3)、式(4)、式(6)和式(14)修改DFIG模型无功给定 Q_{ref} 模块DSL程序。得到的220 kV/500 kV升压变低压侧的风电场输出有功功率、无功功率交互(容性为正)和低压侧母线电压标么值，结果如图7所示。

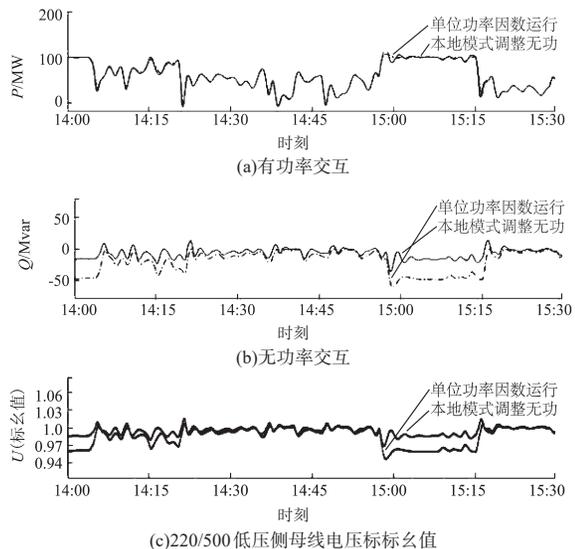


图7 单位功率因数和本地模式无功调整方案结果对比

Fig.7 Comparison between constant power factor and proposed local mode reactive regulation scheme

图7中,实线为本地模式DFIG无功调整方式,虚线为单位功率因数方式。对比结果发现:风电场送出有功基本一致;单位功率因数模式下,送出系统无功损耗较大,特别是在风电机组出力较大时无功交互超出设计运行范围,而本地模式DFIG无功调整方式在风电出力较大时调整DFIG出力使得无功交互较小,满足系统要求从而减小网损;单位功率因数下风电并网点电压水平较低,风电出力较大时长低于风电并网准则要求的最低标准0.97(标么值)(33.95 kV),发生4次电压向下越限,节点电压波动范围0.95~1.01(标么值);本地模式DFIG无功调整方案则有效提升电压水平并保持高于最低并网电压标准,未发生电压向下越限,电压波动范围0.97~1.02(标么值)。

图8为2种工况下3个风电场35 kV母线电压标么值,对于35 kV汇集线路长度较长的2号风电场,输送有功功率较大时电压水平较低;在采用单位功率因数运行方式时,风电场2电压水平最低至0.9(标么值)以下,大大低于并网准则要求,且向下越限次数较多,电压波动范围0.88~1.01(标么值);采用本文提出的本地模式DFIG无功控制策略,电压水平提升较为明显,最低电压保持在0.94(标么值),电压波动范围0.94~1.04(标么值),向下越限次数减少。在实际中,低压汇集线路较长的风电场本地模式调节无功输出,配合母线侧无功补偿装置或采用串联补偿,可以有效提升电压水平。

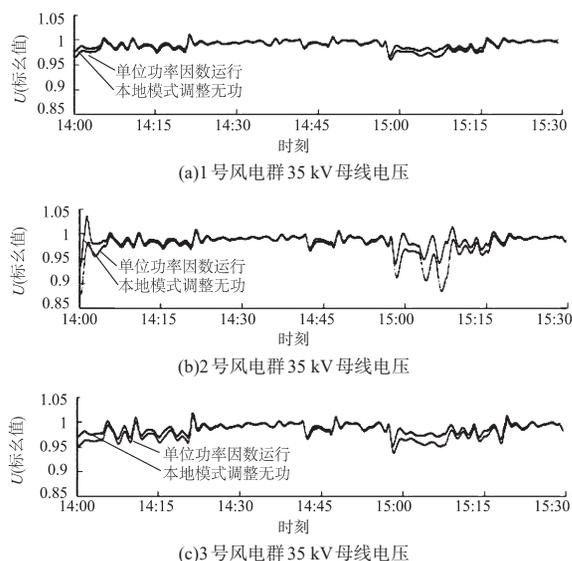


图8 不同模式下子风电群电压标么值

Fig.8 Wind generator clusters voltage nominal value under different reactive power control modes

4 结论

风电汇集送出系统需要无功补偿设备的投入来保证系统的电压和无功交换处于规定范围,而常规的恒功率因数方案风电场电压随着出力波动较大,需要补偿设备配置容量较大且频繁动作。本文在DFIG风电机组无功调节能力和风场汇集系统无功损耗的基础上,给出了一种风电机组参与无功调节的本地模式无功控制方案,通过本地信息的定子电压水平和风电机组出力,结合定、转子电流和静稳极限得出DFIG无功输出极限,给出风电机组的无功输出参考值。算例验证了该方式可以有效减少风电场并网点的无功交互并减小电压波动范围和向下越限次数,220 kV/500 kV升压变低压侧母线电压向下越限次数由4次减少到0次,波动范围减小17%;子风电群电压波动范围最大减小23%,最低电压由0.88(标么值)提升至0.94(标么值)。同时该方法无需机组之间通信实现电压自动调整,并能有效减少无功补偿设备的配置容量,提高风电运行的经济性和灵活性。

参考文献

- [1] 孙蔚,姚良忠,李琰,等.考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):776-785.
- [2] 刁书广,魏颖超,彭冬宇,等.风电场AVC自动电压无功控制概述[J].风能,2016,59(5):56-61.
- [3] 陈惠粉,乔颖,鲁宗相,等.风电场群的无功电压协调控制策略[J].电力系统自动化,2010,34(18):78-83.
- [4] 陈宁,朱凌志,王伟.改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J].中国电机工程学报,2009,29(10):102-108.
- [5] 刘皓明,唐俏俏,朱凌志,等.双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):79-85.
- [6] 赵大伟,马进,钱敏慧,等.海上风电场经交流电缆送出系统的无功配置与协调控制策略[J].电网技术,2017,41(5):1412-1418.
- [7] 王松,李庚银,周明.双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2714-2720.
- [8] 朱洪波,宋颖巍,刘岩,等.风电场无功补偿计算方法与容量配置的研究[J].现代电力,2011,28(6):73-76.
- [9] 张永武,孙爱民,张源超,等.风电场无功补偿容量配置及优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(6):150-156.
- [10] 乔颖,陈惠粉,鲁宗相,等.双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J].电力系统自动化,2013,37(5):15-22.

收稿日期:2018-10-12

修改稿日期:2019-01-26