

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.022

考虑分散式风电的配网电压稳定性研究

李旭锋, 许国东, 杨 靖, 史立勤

(浙江运达风电股份有限公司 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要:根据分散式风电场接入配电网的等效模型,分析了双馈风电机组接入配电网的无功出力特性。利用双馈风电机组快速的动态无功响应特性,提出了风电机组自身无功出力参与各接入点无功电压控制的分散式风电无功电压协调控制方案。通过监测分散式风电场各接入点出力与电压信息,采用过滤集合的原对偶内点法求解无功电压协调控制模型,在满足各接入点电压约束的同时,均衡了风电场的无功裕度,提高了配电网的电压稳定性。通过30节点配电网算例验证了所提模型及控制的合理性和有效性。

关键词:分散式风电;双馈机组;无功控制;电压稳定性

中图分类号:TM921.51;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0538-05

Distribution network voltage stability considering dispersed wind farm

LI Xu-feng, XU Guo-dong, YANG Jing, SHI Liqin

(State Key Laboratory of Wind Power System, Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou, Hangzhou 310012, China)

Abstract: According to reactive power problem of wind plant farm under anti-typhoon operation, a system model was established. The model was composed of many equipment models: standby power, shunt reactors, power transformers, buried cables and wind turbines equivalent model. Then power parameters of the electric models were calculated, so shunt reactor parameter optimization method was proposed. When the wind turbine was equivalent to the model, some subsystems within the wind turbine (including yaw system, hydraulic system, control cabinet fans, ventilation fans) were taken into account, which had different importance in different working conditions. It uses the neural network learning methods for the best weight coefficient. The results compare between the calculation result with the actual trials ones show that error is very small, so it provides a reference means about selecting wind farm device parameter for future.

Key words: dispersed wind power; doubly fed induction generator (DFIG); reactive power control; voltage stability

0 引言

大规模集中式风电场开发已产生风电输送以及危及电网安全稳定运行的问题^[1],因此,风电就近接入配电网的分散式风电项目得到了广泛关注^[2]。分散式风电一般包含多座地理位置分散且彼此相对独立的小型风电场(DWF),场址位于用电负荷中心附近,所产生的电力多点就近接入附近配电网,统一监控,就地消纳。分散式风电场中的双馈风电机组作为重要的无功源,在稳定配电网电压和补偿无功方面可发挥积极的作用。但是分散式风电中各接入点无功调节能力有限,不能独立对接入地区配网电压进行有效的

控制。为了发挥其无功功率的调节能力,可以协调各接入点的无功出力,从而加强接入地区配网的电压稳定性。

近年来,针对分散式风电主要集中于政策及风电注入对配电网影响研究。文献[1-3]针对分散式风电接入和发展趋势,论述了分散式风电接入对地区电网带来的影响并提出了需要采取的应对措施建议。文献[4-7]基于双馈机组的分散式风电场,提出了并联无功补偿方案,综合利用风电场安装的 SVC 无功补偿装置及双馈机组的无功调节能力来实现无功优化。文献[8]讨论了配网对风电分散接入的要求,结合风电机组无功控制能力,推导出满足配网电压调节要求的

收稿日期:2016-11-23

作者简介:李旭锋(1986-),男,山西吕梁人,主要从事风电场并网与电网稳定性分析方面的研究。E-mail:lixf@chinawindey.com

风电机组无功控制范围和对机组设备的要求。但对分散式风电在配网电压波动时的无功支撑作用及分散式风电中各接入点之间的无功电压协调控制鲜有研究。

为了克服分散式风电中各个风电场各自无功电压控制的不足,本研究主要研究多点接入配网的分散式风电场各接入点的无功电压协调控制,协调控制各接入点的无功输出,以实现提高配网整体电压合格率、稳定各接入点电压。

1 分散式风电无功电压分析

1.1 双馈机组暂态无功支撑能力分析

增加双馈机组无功出力会加大转子变流器电流,无功出力主要受转子变流器容量限制。分散式风电接入配电网,属于风电接入弱电网情形,示意图如图1所示。

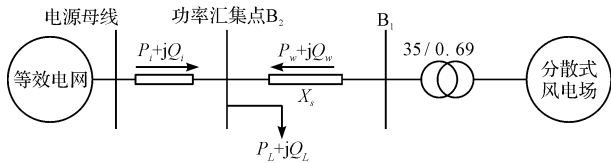


图1 分散式风电接入配网接线图

B_1 —分散式风电出口侧母线, B_2 —接入配电网的母

线, X_s —馈线电抗

若定子电压矢量在定向坐标系的 q 轴上,忽略网侧电磁暂态时,则双馈机组的定子有功 P_s 出力与无功 Q_s 出力可表示为^[9-10]:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3u_{qs}L_m i_{qr}}{2L_s} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left[\frac{u_{qs}L_m i_{dr}}{L_s} - \frac{2u_{qs}}{w_1 L_s} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{dr} , i_{qr} —转子电流 d 、 q 分量; L_s , L_m —定子自感和定转子间的互感; ω_1 , ω_s —同步转速与转差; u_{qs} —定子电压 d 轴分量。

由式(1)可知,定子绕组的无功出力 Q_s 由转子电流 i_{dr} 控制,而 i_{dr} 由 d 轴励磁电压 u_{dr} 控制,其时间常数 $\tau = L/R_r$, τ 的范围一般为 $8 \text{ ms} \sim 15 \text{ ms}$,因此双馈风电机组的无功调节具有 ms 级的快速性,有很快的无功响应能力。如果整个分散式风电场的风电机组协调调节无功会对分散式风电各接入点电压有很大的支撑作用。

分散式风电场出口母线高压侧 B_1 的电压 u_{qs} 受注入无功 Q_s 的影响,二者关系可近似表示为:

$$u_{qs} = u_{qs0} + \frac{Q_s X_s}{u_{qs0}} \quad (2)$$

式中: u_{qs0} —注入无功之前的机端电压。

将(2)代入式(1)得:

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{2Q_s L_s}{3u_{qs0} + \frac{Q_s X_s}{u_{qs0}}} + \frac{u_{qs} + \frac{Q_s X_s}{u_{qs0}}}{w_s L_m} \\ i_{qr} = \frac{2P_s L_s}{3L_m \left(u_{qs0} + \frac{Q_s X_s}{u_{qs0}} \right)} \\ i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \end{cases} \quad (3)$$

由式(2~3)可见,若增大 Q_s ,则 u_{qs0} 增大,同时 i_{qr} 减小,即对于分散式风电接入配网的弱电网而言,无功电流的注入可使母线电压显著升高。由于励磁电流由有功分量和无功分量组成,有功分量和无功分量此消彼长的结果使励磁电流变化规律复杂。根据 X_s 的不同,由式(3)可得到定子无功功率与转子电流的对应关系如图2所示。

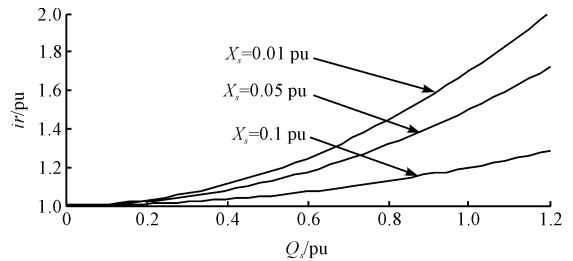


图2 双馈机组接入配网情况下定子无功与转子电流的关系

由图2看出,对配电网 ($X_s \geq 0.1 \text{ pu}$) 而言,当增发无功不大时,转子电流基本不变,当无功功率较大时,转子电流呈现上升趋势,但上升速率不大,由此可得增发无功对转子变频器的过流影响不大,因此分散式风电接入配网,可以更加有效利用风电场中双馈风电机组的无功调节能力。

1.2 风电机组间的无功分配

分散式风电场的有功功率控制策略以最大捕捉风能为目标,各台风力发电机组根据实际风速和转速或转矩的控制规律由各自的控制系统实现。而无功的控制则由分散式风电场统一监控,电网调度系统通过分散式风电场整体运行的数据信息和电网无功的需求,向分散式风电场监控系统下达无功功率参考命令。分散式风电场各小风场无功需求按无功极限比例分配原则分配到各个分散小风场上各台机组。分散接入配网的各个小风场之间根据调度指令,协调无功出力,稳定配网电压。各机组根据实际运行情况和无功极限按比例分配原则得到所需要发出或吸收的无功如下式所示:

$$Q_{iref} = \frac{Q_{imax}}{\sum_{i=1}^m Q_{imax}} Q_{POIn_ref} \quad (4)$$

式中: m —分散式风电场中第 n 个风场双馈机组的台数, Q_{imax} —每台风力发电机组无功发生极限, Q_{POIn_ref} —整个分散式风电场第 n 个接入点无功需求参考值, Q_{iref} —第 i 风力发电机组无功功率参考值。

双馈风电机组的有功无功解耦控制,因此在单台风机转子电流不越限的情况下,风机的无功调节不会对有功输出造成影响。双馈机组的单机无功调节速度快,而分散式风电场级无功需求整定相对缓慢,风电机组无功分配层可以较快地响应分散式风电中各接入点的无功需求。两个控制层互相协调即可达到对分散式风电电压中短期控制的目的。

2 分散式风电无功协调控制

2.1 目标函数

分散式风电场无功电压控制的目标是保证配网电压的安全,因此,以分散式风电场各接入点实际电压与电压目标值的偏差平方和最小为目标,如下式所示:

$$\min f = \sum_{i=1}^n (V_i - V_{iref})^2 \quad (5)$$

式中: n —分散式风电场接入点个数; V_i, V_{iref} —分散式风电场接入点 i 的实际电压与电压目标值(由上级调度在考虑系统各接入点电压安全性的基础上,经过计算给出); f —分散式风电场的电压偏差指标。

2.2 约束条件

风电机组的无功电压控制策略的等式约束即系统潮流方程如下式所示:

$$\begin{aligned} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{Ns} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^{Ns} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

在潮流计算中,分散式风电场中各接入点 PQ 节点,当各接入点中风电机组发出的无功超过无功极限时,其无功出力按照式(7)进行修正。

$$Q_g = \begin{cases} Q_{gmax} & Q_g > Q_{gmax} \\ Q_{gmin} & Q_g < Q_{gmin} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_g, Q_g —双馈机组的有功、无功; Q_{gmin}, Q_{gmax} —无功出力下限和上限。

控制变量约束包括分散式风电场中各双馈机组无功出力,双馈机组的无功发生范围约束;配电网中电容

器组等无功补偿设备;状态变量约束包括各接入点电压安全约束,如下式所示:

$$\begin{aligned} V_{POImin} &\leq V_{POI} \leq V_{POImax} \\ t_{imin} &\leq t_i \leq t_{imax} \\ Q_{fimin} &\leq Q_{fi} \leq Q_{fimax} \\ Q_{cimax} &\leq Q_{ci} \leq Q_{cimax} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 求解算法

过滤集合的内点算法在处理非线性问题时鲁棒性强、收敛性好、寻优速度快的特点得到了广泛的运用^[13]。本研究利用 IPFA 算法求解分散式风电场无功电压协调控制模型,具的流程如图 3 所示。

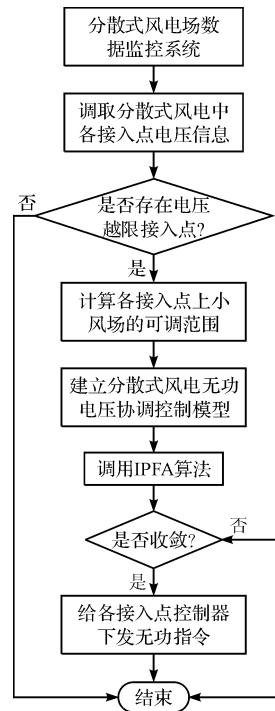


图 3 分散式风电无功电压协调控制流程图

3 分散式风电场并网仿真模型

为便于分析接入点之间无功协调,该案例中的两个分散式风电场 DWF1 与 DWF2 由两点接入 IEEE-30 节点系统。DWF1 安装 1.5 MW 风力发电机组 7 台,总装机容量 10.5 MW,送出线路长 3 km,采用 LGJ-400 型架空线路接入 IEEE-30 节点系统 26 节点(POI1)。DWF2 安装 1.5 MW 风力发电机组 20 台,总装机容量为 30 MW,送出线路长 13 km,采用 LGJ-400 型架空线路接入 IEEE-30 节点系统 10 节点(POI2)。鉴于接入位置的分散性,本研究假设各接入点处的风速状况相同,但时间上存在一定的偏移。为便于分析,假设 DWF2 一直处于迎风向的上方向。

为验证该分散式风电无功协调控制策略的有效性,本研究在风速波动与风电场不同运行工况下,对比

两个小风场依靠各自风电机组独立控制及协调控制接入点电压的稳定性。IEEE-30 节点系统如图 4 所示。

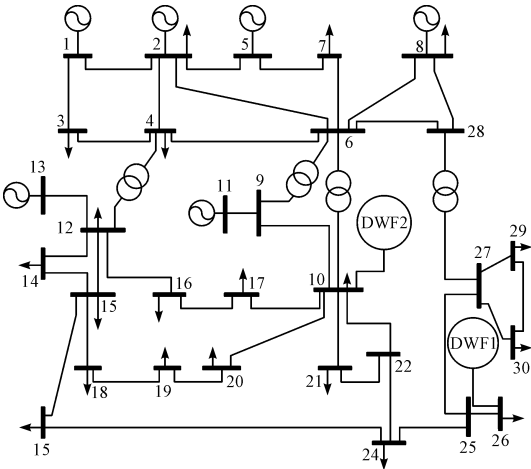


图 4 IEEE-30 节点系统

3.1 风速连续变化的仿真分析

DWF1 与 DWF2 实际日风速曲线和有功率曲线如图 5、图 6 所示。

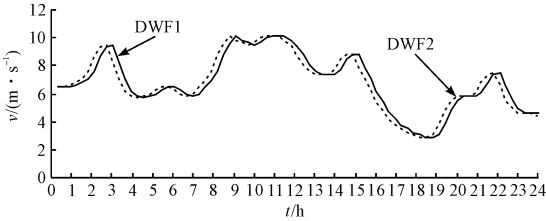


图 5 实际日风速变化曲线

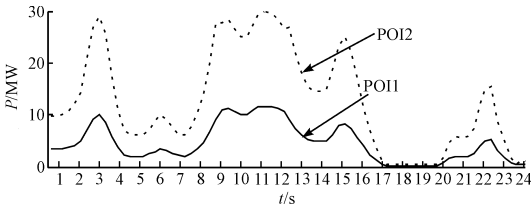


图 6 POI1 与 POI2 有功率曲线

分散式风电接入后,设定负荷侧期望电压为 1 pu,允许的电压变化范围是[0.93 pu、1.07 pu],POI1 点电压变化曲线如图 7 所示。

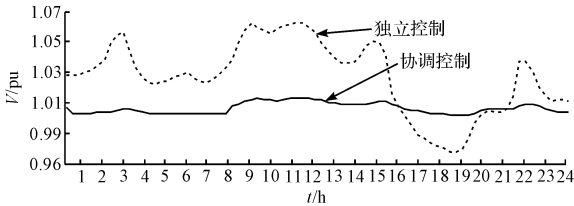


图 7 POI1 点电压变化曲线

由于接入点 1 接入配网的末端,从图 7 可以看出,DWF1 基本可以实现接入点 1 的电压控制。但是在外界风速较大时,风机出力较多,由于接入点 1 的风电功

率渗透率相对较大导致其电压控制效果变差,但仍可以维持在允许的范围内。接入点之间协调控制后,能有效避免接入点 1 接近满出力时电压临界上限运行,增强接入点 1 的运行稳定性。POI2 点电压变化曲线如图 8 所示。

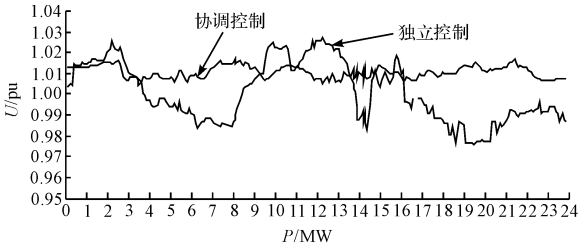


图 8 POI2 点电压变化曲线

通过图 8 可以看出分散式风电场接入点 2 由于接入配网的主馈线,处于配网的中心位置,所以接入点 2 的母线电压受风电出力波动的影响很小。通过风电场 2 内风电机组自身的无功调节就可以实现 POI2 电压的有效控制。各接入点上风电场协调控制能更加有效地抑制接入点 2 电压的波动。

3.2 接入点有功出力连续变化的仿真分析

分散式风电场中 DWF1 与 DWF2 的有功出力从 0 增加到其额定出力时,在风电机组恒功率因数运行、各个 DWF 独立控制各自 PCC 点电压以及 DWF 之间协调控制无功电压 3 种工况下,POI1 的 PV 曲线如图 9 所示。

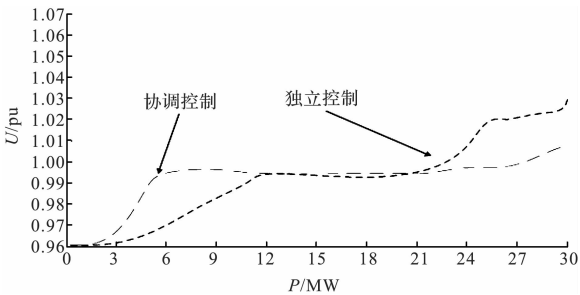


图 9 接入点 1PV 曲线

从图 9 接入点 1 的 PV 曲线可以看出,DWF1 有功出力小于 4 MW 和大于 7 MW 的情况下,DWF1 与 DWF2 协调控制较各接入点独立控制与恒定功率因数(0.98)运行有更好的控制效果,在风电场 1 有功出力过小的时,风电场 1 注入节点 1 的功率过低,节点 1 的有功缺额将由大电网提供,配网馈线损耗增加,接入点 1 的电压降低。分散式风电协调控制可利用风电场 2 的无功支撑节点 1 的电压,可有效提高接入点 1 有功出力较小时的电压;在分散式风电场整体有功出力过大的时,协调控制可有效避免接入点 1 电压临界上限运行。接入点 2PV 曲线如图 10 所示。

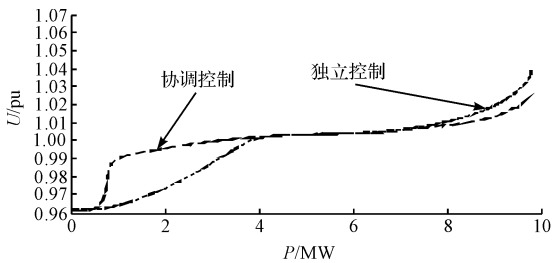


图 10 接入点 2PV 曲线

从图 10 的接入点 2 的 PV 曲线可以看出,在 DWF2 有功出力小于 12 MW 和大于 22 MW 的情况下,DWF1 与 DWF2 协调控制较各自独立控制与恒定功率(0.98)运行有更好的控制效果,由于 DWF2 接入配网的中枢节点,其抗风电出力扰动的能力较强,风电出力波动对其影响较小。

从图 9 与图 10 对比分析可以看出,DWF1 与 DWF2 由于接入配网不同部位,其给接入点带来的电压影响也各不相同,DWF 接入点越接近配网末端,其出力波动给接入点带来的电压波动越大,对配网电压的电压稳定越不利。通过各 DWF 的协调控制,可以改善分散式风电中地理位置分散的小风场出力波动给各自接入点带来的电压波动,提高系统稳定性。

4 结束语

本研究协调各 DWF 的无功出力,通过对实际分散式风电场的仿真分析,得到的主要结论如下:

(1)分散式风电场接入点位于配电网的末端时,风电接入对配网的影响较大。当接入点上风电场风电增加到一定容量时,会导致接入点电压升高,降低其静态电压稳定性;

(2)当接入点处于配电网的中心位置时,风电接入对其接入点电压影响较小,因此单个接入点的接入容量相对较大;

(3)分散式风电多点接入配网,各 POI 上的风电场协调控制可以增加配网接入风电的容量。同时能为配网提供电压支撑,均衡各接入点的无功裕度,增强整个配网系统中分散式风电接入点综合电压稳定性,通过利用风电机组自身的无功出力来减小风场无功补偿设备的投入。

参考文献 (References):

- [1] 王 刚,杜凌艳,黄 炯,等.分散式风力发电机组的电压控制[J].可再生能源,2014,32(7):944-949.
- [2] 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.
- [3] 厉 伟,颜 宁,张 博,等.分散式风电场 DFIG 与 SVC 协调无功控制策略[J].电工电能新技术,2014,33(7):18-24.
- [4] 王 琦,袁 越,陈 宁,等.多风场接入局部电网的无功协调分配方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):76-83.
- [5] 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.
- [6] 杨 硕,王伟胜,刘 纯,等.计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4761-4768.
- [7] 戚永志,刘玉田.基于竞争博弈的风电爬坡协同控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4341-4349.
- [8] 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.
- [9] 张立强,练 敏,张婧芳.液压型风力发电机的恒转速控制[J].液压气动与密封,2015(2):37-39.
- [10] 张武军,叶剑锋,梁伟杰,等.基于改进遗传算法的多目标无功优化[J].电网技术,2004,28(11):67-71.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

李旭锋,许国东,杨 靖,等.考虑分散式风电的配网电压稳定性研究[J].机电工程,2017,34(5):538-542.

LI Xu-feng, XV Guo-dong, YANG Jing, et al. Distribution network voltage stability considering dispersed wind farm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(5):538-542.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>