

考虑 DFIG 机组容量限制的风电场功率分配方法

黄崇鑫, 张凯锋, 戴先中, 张冠虎

(复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 当风电场参与系统的有功无功控制时, 它将面临如何将有功无功调度指令分配到底层风电机组的问题。针对 DFIG 风电场, 介绍了 DFIG 的基本有功无功解耦控制框架。考虑到 DFIG 机组的额定容量限制, 根据有功可能出力大的机组所分担的有功多, 有功出力多的机组所分担的无功少这一原则, 采用一种简单有效的风电场有功无功分配算法, 可以合理利用各台机组的有功无功容量, 减少视在功率饱和。在设计分配算法时, 提出一种修正有功无功指令的方案, 以消除因风电场内部有功无功损耗所引起的跟踪误差。利用 Matlab/SimpowerSystems 软件进行了仿真试验, 仿真结果验证了该功率分配方法及修正指令方案的可行性。

关键词: 双馈感应电机; 风电场; 风力发电; 有功无功分配

A power distribution method for a wind farm considering the limitations of rated capacity of DFIG units

HUANG Chong-xin, ZHANG Kai-feng, DAI Xian-zhong, ZHANG Guan-hu

(Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Wind farms confront the issue that how active and reactive power dispatching commands are distributed among the local wind power generators when participating in the active and reactive power control of a system. In view of a wind farm completely constituted by double fed induction generators (DFIG), firstly, the basic frame of decoupling control of active and reactive power of a DFIG is introduced. Subsequently, according to the principle that the generator with more active power abilities shares more active power and the one with more active power production shares less reactive power, this paper adopts a simple and effective distribution algorithm of active and reactive power for a wind farm, considering the limitations of rated capacities of DFIG units. The distribution algorithm is capable of utilizing the active and reactive power capacity of GFIG reasonably and lessening the apparent power saturation. Moreover, in the process of designing the algorithm, a method of modifying active and reactive power reference signals is proposed to eliminate the tracking errors caused by the loss of active and reactive power in the wind farm. In the end, MATLAB/Simpower Systems software is employed to make simulation tests, and the results verify the feasibilities of the distribution strategy and the references modification method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50507002 and No.60974036).

Key words: double fed induction generator; wind farm; wind power generation; active and reactive power distribution

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0202-06

0 引言

随着常规能源的枯竭, 可再生能源将成为未来能源的重要组成部分。由于风能其储存量大又易于形成规模, 并且风力发电技术相对成熟, 因此风能作为一种绿色能源在近几十年得到了广泛的开发和利用。一些容量大、可控性好的风力发电机组(如

DFIG 机组)相继投入运行, 风电场容量也从过去的几十兆瓦增加到几百兆瓦。在欧洲, 一些国家如丹麦、西班牙、德国等, 他们的风电渗透率已到达 20%以上^[1-2]。我国正在内蒙、新疆、甘肃、河北、吉林、江苏沿海等风能资源丰富的地区, 筹划建设 7 个千万千瓦级的风电基地, 这将使我国局部电网的风电渗透率迅速增加。

在过去, 因为风电场的容量较小, 系统的风电渗透率较低, 并且风电机组的可控性相对较差, 调度部门通常不要求风电场参与系统的有功和无功控

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507002, 60974036), 教育部博士点基金项目(20090092110020)

制。在目前大规模风电场接入电网的形势下,调度部门将采取强制措施,要求风电场参与系统的有功无功控制。这一方面,由于新建的或经改造升级的风电场大多具备了有功无功控制能力;另一方面,对于一个风电穿透率较高的系统,若仅依靠传统机组来承担有功无功控制任务,将难以维持系统的频率稳定和电压稳定^[3]。那么,当风电场参与有功无功控制时,风电场将面临如何将有功无功调度指令合理地分配到底层风电机组的问题。

文献[4]针对 DFIG 风电场,提出了比例分配算法和比例积分算法,用于分配风电场的无功指令,并分析了这两种算法的优缺点。文献[5]在分析了 DFIG 风电场的有功无功控制特性之后,给出了一种风电场有功无功的比例分配算法,并且通过建立包含 3 台 DFIG 机组的风电场模型,进行了相应的仿真验证。文献[6]利用包含 6 台 1.5 MW DFIG 机组的风电场模型,仿真分析了有功无功相互协调的比例分配算法,但在仿真试验中没有考虑风电场内的风速多样性。

文献[7]基于分层控制原则给出了风电场的无功控制策略,并且提出了风电场无功指令按等功率因数分配的算法。这种分配方法虽然能够保证各 DFIG 机组的功率因数相同,但该方法可能会使风电场的一部分 DFIG 机组出现无功饱和,而另一部分机组的无功容量却没有得到充分的利用。因为按等功率因数分配就意味着有功出力多的机组无功出力多,而实际上,每台 DFIG 机组的有功无功出力受到其额定视在功率的约束。

针对 DFIG 风电场的额定容量限制,根据“有功可能出力大的机组所分担的有功多,有功出力多的机组所分担的无功少”的原则,设计出风电场有功无功协调比例分配算法。这种算法既可以充分利用各机组的有功无功容量,又可以兼顾各机组的视在功率约束。同时,考虑到风电场内部的有功无功损耗问题,提出了一种风电场的有功无功指令修正方案,以消除因损耗所产生的风电场出口端的有功无功跟踪误差。针对所采用的分配算法和所提出的指令修正方案,本文建立了一个 90 MW 的 DFIG 风电场仿真系统进行仿真验证。

1 DFIG 机组的有功无功控制

1.1 DFIG 机组的基本结构

DFIG 机组的原理结构图,如图 1 所示^[8]。DFIG 主要由转子带绕组的感应电机、背靠背电力电子变换器、齿轮箱、桨距角调节器等元器件构成。

在图 1 中,转子侧变换器(Rotor Side Converter,

RSC)向感应电机提供交流励磁电压。通过控制励磁电压的频率、幅值、相位,可以控制感应电机的转子转速、定子的有功功率和无功功率。网侧变换器(Grid Side Converter, GSC)用于稳定直流电容电压,同时平衡 RSC 与转子交换的有功功率。在容量允许的情况下,GSC 可作为小容量的 STATCOM 运行。

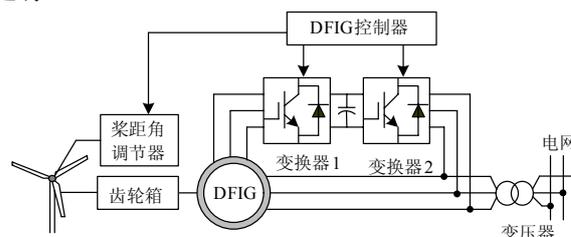


图 1 DFIG 的原理结构图

Fig.1 Schematic structure diagram of DFIG

桨距角调节器用于调节风轮机叶片的桨距角,以使风轮机运行于最佳风能捕捉状态。当风速低于额定值时,桨距角一般保持为 0° 以获得最佳风能系数。当风速高于额定值时,通过适当地增加风轮机桨距角度来减小风能系数,从而确保 DFIG 恒定地输出最大功率。

齿轮箱用于机械能传递和变速,它将风轮机的机械能传递给感应电机的转子,并使转子获得所需的转速。

1.2 DFIG 的有功无功解耦控制

在相应的旋转坐标系下,通过控制 RSC 提供给转子励磁电流的有功分量和无功分量,可以实现 DFIG 机组的定子有功无功解耦控制,其常用的控制框图如图 2 所示^[9]。在图 2 中,将转子转速的偏差经比例积分放大后,作为 RSC 的有功电流分量参考值,并将该参考值限幅在额定范围之内。与此同时,把 DFIG 的无功偏差经比例积分放大后,作为 DFIG 电网侧的电压参考值,并将其限制在额定电压范围之内。这主要是因为 DFIG 输出或吸收无功都表现为 DFIG 电网侧的电压升高或降低。然后,把 DFIG 的电网侧电压的偏差经比例积分放大后,作为 RSC 的无功电流分量参考值,并对其进行限幅。此时,无功电流分量的最大容许值为^[10]:

$$I_{rd}^{\max} = \sqrt{(I_r^{\max})^2 - (I_{rq}^{\text{ref}})^2} \quad (1)$$

其中: I_r^{\max} 为 RSC 的额定电流; I_{rq}^{ref} 为有功电流分量参考值。这种限幅方法,在首先满足有功电流分量的前提下,保证了最终的转子电流参考值 $\sqrt{(I_{rd}^{\text{ref}})^2 + (I_{rq}^{\text{ref}})^2}$ 不会超过额定值 I_r^{\max} 。

在获得有功电流和无功电流分量参考值之后,

参考值的跟踪通过电流控制环节和脉冲调制模块来实现。

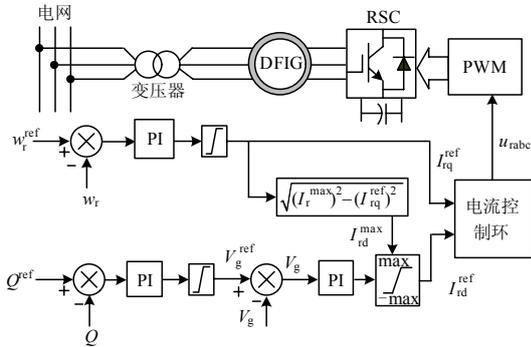


图2 转子侧变换器控制框图

Fig.2 Control diagram of RSC

在与电网同步的旋转坐标系下，GSC的控制框图如图3所示^[9]。在控制GSC的有功时，将直流电压偏差经比例积分放大后作为GSC有功电流参考值，并将其限制在GSC的电流额定范围之内。无功控制则是将图2中的网侧电压偏差经比例积分放大后作为GSC的无功电流分量参考值，并对其限幅。此时，无功电流分量的最大容许值为：

$$I_{gq}^{max} = \sqrt{(I_g^{max})^2 - (I_{gd}^{ref})^2} \quad (2)$$

其中： I_g^{max} 为GSC的额定电流； I_{gd}^{ref} 为有功电流分量参考值。利用式(2)的限幅方法，可以保证GSC的电流额定值 I_g^{max} 的范围之内。

同样地，GSC的电流参考值跟踪也是通过GSC的电流控制环节和脉宽调制模块来实现。

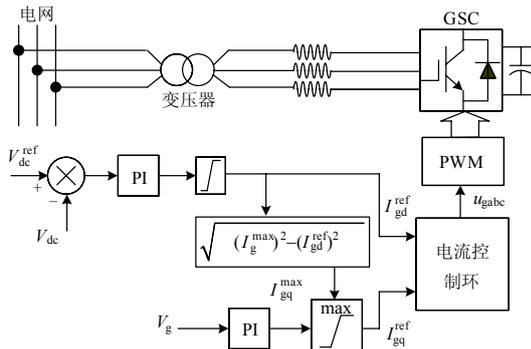


图3 网侧变换器控制框图

Fig.3 Control diagram of GSC

1.3 桨距角有功控制

风电机组输出的有功功率主要决定于风轮机所捕获的风能，风轮机的机械功率为^[10]：

$$P_M = \frac{1}{2} A \rho v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3)$$

式中： A 为叶片扫过面积； ρ 为空气密度； v 为风

速； C_p 为风轮机的功率系数。由式(3)可知，控制风电机组的有功输出可以通过调节风轮机的功率系数 C_p 来实现。风轮机桨距角 β 是影响功率系数 C_p 的重要参数，通常认为功率系数 C_p 随桨距角 β 增大而减小。利用这一特性，可以通过控制风轮机的叶片桨距角来控制风电机组的有功功率输出，其控制框图如图4所示。

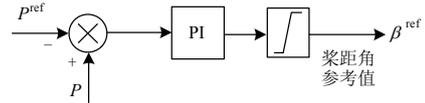


图4 桨距角控制框图

Fig.4 Control diagram of the pitch angle

2 风电场有功无功分配策略

2.1 有功无功分配框架

风电场有功无功的分配框架如图5所示。调度部门根据系统运行的需要，制定出针对风电场的调度计划，并将有功无功调度指令下发给风电场。风电场根据本地监控信息，利用设计好的分配算法将有功无功指令合理地分配到底层各DFIG机组。所设计的有功无功分配算法，首先应当避免分配给DFIG机组的有功无功指令超出机组的能力范围，其次要求风电场实际的有功无功出力应与调度指令相一致。底层的DFIG机组在接到风电场的指令后，调整各自的有功无功出力以响应风电场指令。

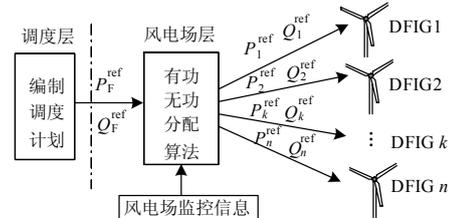


图5 风电场功率指令分配框架

Fig.5 Distribution frame of power references in wind farm

2.2 有功无功的分配算法

在设计风电场的有功无功分配算法时，考虑到DFIG机组受到额定容量的限制，为充分利用各台机组的有功无功容量和尽可能避免机组视在功率饱和，本文的分配算法主要是基于以下原则：

- 1) 有功可能出力越大的机组，风电场分配给它的有功任务越多；
- 2) 有功输出越多的机组，分配给它的无功任务则越少。

根据以上原则，按比例分配的算法，则有功指令的表达式为^[5]：

$$P_i^{\text{ref}} = \frac{P_{M_i}^{\text{opt}}}{P_{\Sigma}^{\text{opt}}} P_D^{\text{ref}} \quad (4)$$

其中: P_i^{ref} 为第 i 台 DFIG 的有功指令; $P_{M_i}^{\text{opt}}$ 为第 i 台 DFIG 的最优机械功率; $P_{\Sigma}^{\text{opt}} = \sum P_{M_i}^{\text{opt}}$ 为风电场内各机组的最优机械功率之和; P_D^{ref} 为风电场待分配的有功指令。

第 i 台机组的最优功率输出为:

$$P_{M_i}^{\text{opt}} = \frac{1}{2} A_i \rho_i v_i^3 C_p^{\text{opt}}(\lambda_i, \beta_i) \quad (5)$$

式中: C_p^{opt} 为风轮机的最优功率系数。由于本文所考虑的由同一类型的 DFIG 机组构成的风电场, 因此在同一风电场内, 空气密度 ρ_i 近似相同。各 DFIG 机组具有相同的叶片扫过面积 A_i 和近似的最优功率系数 C_p^{opt} (β_i 均为 0°)。那么, 由式 (4)、(5) 可得:

$$P_i^{\text{ref}} = \frac{v_i^3}{v_{\Sigma}^3} P_D^{\text{ref}} = k_i^P P_D^{\text{ref}} \quad (6)$$

其中: $v_{\Sigma}^3 = \sum v_i^3$ 。那么 k_i^P 为风电场第 i 台机组的有功分配比例系数。

在分配无功指令时, 同样根据以上原则按无功能力的大小进行比例分配, 分配的表达式为:

$$Q_i^{\text{ref}} = \frac{Q_i^{\text{max}}}{Q_{\Sigma}^{\text{max}}} Q_D^{\text{ref}} \quad (7)$$

其中: Q_i^{max} 为第 i 台 DFIG 的无功可用容量; $Q_{\Sigma}^{\text{max}} = \sum Q_i^{\text{max}}$ 为风电场内各机组的无功可用容量之和; Q_D^{ref} 为风电场待分配的无功指令。

由于各机组的有功无功出力均受到其额定视在功率的限制, 在优先保证有功容量的前提下, 第 i 台 DFIG 机组的最大无功容量为:

$$Q_i^{\text{max}} = \sqrt{(S_i^N)^2 - P_i^2} \quad (8)$$

其中: S_i^N 为第 i 台机组的额定视在功率; P_i 为有功输出功率。那么, 由式 (7)、(8) 可得:

$$Q_i^{\text{ref}} = \frac{\sqrt{(S_i^N)^2 - P_i^2}}{\sum \sqrt{(S_i^N)^2 - P_i^2}} Q_D^{\text{ref}} = k_i^Q Q_D^{\text{ref}} \quad (9)$$

其中, k_i^Q 为第 i 台机组的无功分配比例系数。

综上所述, 由式 (6) 可知, 对于同一机组类型的风电场, 风速越大的机组其有功可能出力越大, 对应的有功分配比例系数越大。而从式 (9) 可以看出, 在额定视在功率的约束下, 有功出力越大的机组所分配的无功指令越少, 即无功分配比例系数越小。

2.3 有功无功指令修正方案

如果根据以上给出的有功无功分配算法, 直接

对调度部门下达给风电场的有功无功指令进行分配, 那么由于风电场内的集电线路以及变压器存在有功无功损耗, 这样将会使风电场输出的有功无功偏离调度部门下达的有功无功指令值。为了消除风电场的有功无功跟踪误差, 对有功无功调度指令做如式 (10) 修正:

$$\begin{cases} P_D^{\text{ref}} = P_F^{\text{ref}} + P_F^{\text{loss}} \\ Q_D^{\text{ref}} = Q_F^{\text{ref}} + Q_F^{\text{loss}} \end{cases} \quad (10)$$

其中: P_F^{ref} 、 Q_F^{ref} 分别为调度部门有功、无功指令; P_F^{loss} 、 Q_F^{loss} 分别为风电场内损失的有功和无功。但实际上, 要精确计算出风电场损失的有功和无功相当困难。本文提出利用 PI 调节器来整定出风电场的有功无功损耗, 其原理框图 6 所示。

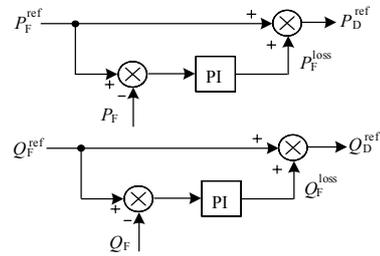


图 6 风电场有功无功指令修正框图

Fig.6 Diagram for modifying active and reactive power references of the wind farm

利用图 6 所示的有功无功指令修正方案, 不仅可以准确地整定出风电场内的有功无功损耗, 更重要的是, 通过该修正环节可以在风电场层形成闭环控制回路, 这样可以增强风电场有功无功分配算法的鲁棒性, 准确地跟踪调度部门的有功无功指令。

3 算例仿真分析

3.1 系统仿真模型

本文利用 Matlab/SimPowerSystems 软件建立了仿真试验模型, 其仿真结构图如图 7 所示。在图 7 中, 110 kV 母线 1 的短路容量为 500 MVA, 母线 1 与公共耦合点 (Point of Common Coupling, PCC) 之间的架空线路长度为 30 km。风电场的额定容量为 90 MW, 由 60 台 GE 1.5 MW 的 DFIG 机组构成, DFIG 机组的相关参数可参阅文献[11]。在风电场内, 共有 6 条 35 kV 馈线, 每条馈线包含 10 台风机, 每台 DFIG 机组通过低压变压器与馈线相连。假设风电场风向如图 7 中所示, 根据风电场的风向, 近似认为同一条馈线上的风机风速相同。为了简化仿真系统结构, 提高系统仿真速度, 将每条集电线上的 10 台 DFIG 机组用一台等值的 15 MW 的 DFIG 机组代替。

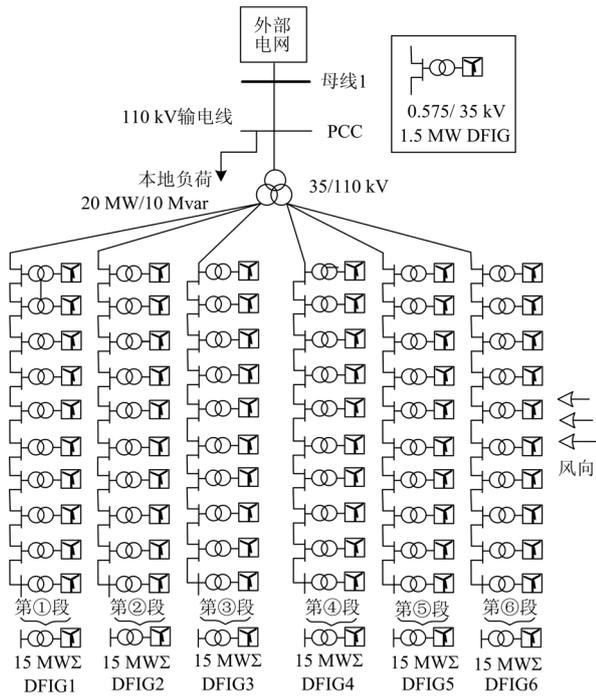


图 7 DFIG 风电场仿真模型结构图

Fig.7 Simulation structure diagram of the DFIG wind farm

3.2 系统仿真

本仿真系统主要用于模拟在调度指令下发后，风电场内部有功无功的分配以及执行情况。针对风电场层的调度指令为：在 0~20 s 之间，风电场有功按最大出力运行，且保持单位功率运行；在 20 s 时，减少有功出力至 40 MW（下降速度为 10 MW/s），无功出力增加至 20 Mvar（上升速度为 10 Mvar/s）；在 50 s 时，有功保持不变，无功减少至 10 Mvar；在 70 s 时，有功重新运行在最大出力状态；在 80 s 后，风电场保持最大出力运行，且保持单位功率因数。

图 8 是风电场各 DFIG 机组的风速，用于模拟风电场内风速分布的多样性。

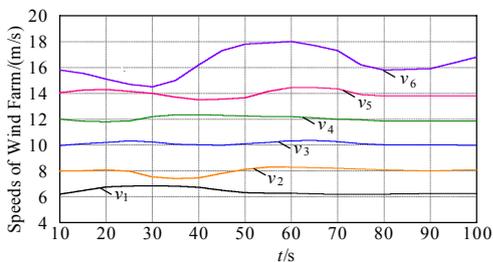


图 8 风电场风速

Fig.8 Wind speeds of the wind farm

图 9 是风电场响应有功调度指令的有功输出波形。从图 9 可知，在不考虑风电场内部的有功损耗

而直接对有功调度指令进行分配时，风电场的有功输出与有功指令存在约 2 MW 的偏差。而利用通过有功指令修正后，风电场有功输出能够实现稳态无偏差地响应有功调度指令。但是在响应有功指令时，有 15 s 左右的暂态过渡时期，这主要由风轮机桨距角的机械大惯性特性引起的。

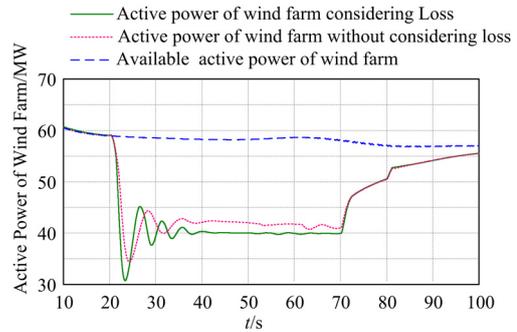


图 9 风电场的有功输出

Fig.9 Active power generated by the wind farm

图 10 是风电场响应无功调度指令的无功输出波形。由图 10 可知，在不考虑风电场内部的无功损耗的情况下，风电场实际的无功输出和调度指令将出现约 3 Mvar 的偏差，而通过无功调度指令修正后，可以消除无功的稳态误差。与有功的响应速度相比，无功的响应速度较快，这主要是因为控制 DFIG 无功输出主要是电气控制过程，通常情况下电气响应时间比桨距角的机械响应时间要短。

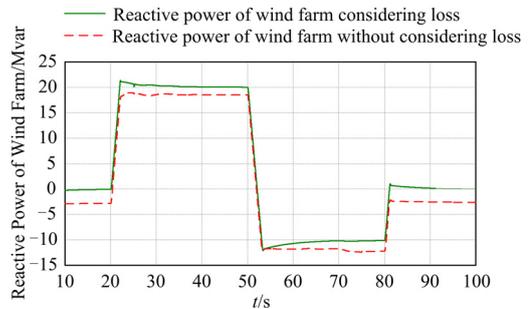


图 10 风电场的无功输出

Fig.10 Reactive power generated by the wind farm

图 11 是风电场内六台等值风机各自的有功输出波形。结合图 8 所示的风速波形可知，利用本文的有功分配算法，实现了预期的“最大可能出力越大的机组承担有功出力指令越多”的有功比例分配效果。

图 12 是风电场内各等值 DFIG 机组的无功输出波形。结合图 10 所示的各 DFIG 机组的有功输出波形可知，利用本文的无功分配算法，同样也达到了预期的“有功出力越大的机组承担无功出力指令越少”的分配效果。

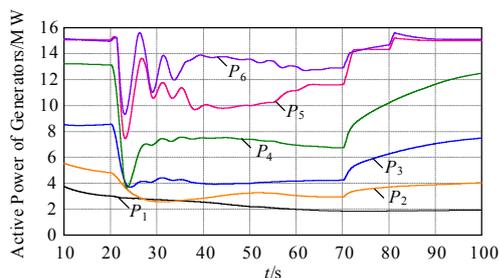


图 11 DFIG 机组的有功输出

Fig.11 Active power generated by DFIG units

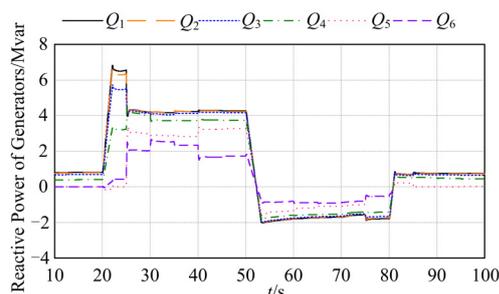


图 12 DFIG 机组的无功输出

Fig.12 Reactive power generated by DFIG units

图 13 是各 DFIG 机组的视在功率波形。由图 13 可知, 各机组输出的视在功率均在额定容量 (15 MW) 范围之内。这表明有功无功分配算法, 能够在一定程度上避免 DFIG 机组的视在功率超限。

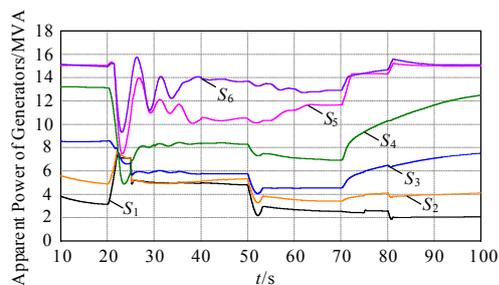


图 13 风电场各机组的视在功率

Fig.13 Apparent power of generators in wind farm

4 结论

本文针对 DFIG 风电场, 采用了一种有功无功相互协调的比例分配算法。这种分配策略可以合理地利用各台机组的有功无功容量, 减少视在功率饱和。同时, 考虑到风电场内的有功无功损耗问题, 提出了一种风电场有功无功指令修正方案, 解决了因损耗所引起的稳态跟踪误差问题。

然而, 本文主要是针对同一类型的 DFIG 风电场来设计有功无功分配算法, 若对于混合多种风电

机组的风电场, 该分配方法则有待改进。同时, 本文的有功无功分配算法还不是最优算法, 尚不能充分考虑风电机组的各种约束实现功率最优分配。

参考文献

- [1] Erikson P B, Ackermann T, Abildgaard H. System operation with high wind penetration[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2005, 3 (6) : 65-74.
- [2] World Wind Energy Association. World wind energy report 2009[EB/OL]. (2010-06-15) [2010-05-20]. http://www.windea.org/home/index.php?option=com_frontendpage&Itemid=1.
- [3] Bousseau P, Belhomme R, Monnot E, et al. Contribution of wind farms to ancillary services[C]. //International Council on Large Electric Systems. Artois (France) : 2006.
- [4] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X, et al. Reactive power control of a wind farm made up with doubly fed induction generators II[C]. //IEEE Power Tech Proceedings. Porto (Portugal) : 2001.
- [5] Anca D H, Poul S, Florin I, et al. Centralized power control of wind farm with doubly fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2006, 31(7):935-951.
- [6] 惠晶, 顾鑫. 大型风电场的集中功率控制策略研究[J]. 华东电力, 2008, 36 (6) : 57-62.
- [7] HUI Jing, GU Xin. Research on centralized power control strategies for large wind farms[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (6) : 57-62.
- [8] 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.
- [9] WANG Song-yan, ZHU Ling-zhi, 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.
- [10] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly-fed induction generator using back-to-back PWM converters and its applications to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings on Electrical Power Applications, 1996, 143 (3) : 231-341.
- [11] Gagnon R, Sybille G, Bernard S, et al. Modeling and real-time simulation of a doubly-fed induction generator driven by a wind turbine[C]. //Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients. Montreal (Canada) : 2005.
- [12] ZHANG Jian-zhong, MING Cheng, ZHE Chen, et al. Pitch angle control for variable speed wind turbines[C]. //Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing (China) : 2008.

(下转第 214 页 continued on page 214)

GU He-rong, YANG Zi-long, WU Wei-yang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (9) : 108-112.

[5] 戴训江, 晁勤. 光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4) : 25-30.

DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Research of adaptive current hysteresis band track control for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (4) : 25-30.

[6] 许颇, 张崇巍, 张兴. 三相光伏并网逆变器控制及其反孤岛效应[J]. 合肥工业大学学报, 2006, 29 (9) : 1139-1143.

XU Po, ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Research on the whole control schemes and anti-islanding protection for the three-phase grid-connected photovoltaic inverter[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2006, 29 (9) : 1139-1143.

[7] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3) : 810-816.

[8] LIU Fu-rong, KANG Yong. Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method[C]. //Applied Power Electronics Conference. 2007 : 1379-1384.

[9] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Determining the

relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (2) : 290-296.

[10] 刘芙蓉, 康勇. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 95-99.

LIU Fu-rong, KANG Yong. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 95-99.

[11] 郑诗程, 丁明, 苏建徽, 等. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12) : 3085-3088.

ZHENG Shi-cheng, DING Ming, SU Jian-hui. Simulation and experiment research of photovoltaic generation system and its islanding[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (12) : 3085-3088.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

李冬辉(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事计算机控制、电力电子应用、楼宇自动化等方面的研究; E-mail: lidonghui@tju.edu.cn

王鹤雄(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、光伏发电系统、楼宇自动化等方面的研究;

朱晓丹(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、电力电子应用方面的研究。

(上接第 201 页 continued from page 201)

[15] 谭东. 广东省峰谷电价实施及大工业用户响应研究[J]. 湖北电力, 2003, 27 (5) : 55-57.

TAN Dong. The implementation of peak and valley time price for electricity in Guangdong and the research of large industrial consumer response[J]. Hubei Electric Power, 2003, 27 (5) : 55-57.

[16] 杨大雄, 陈雁. 上海市峰谷分时电价特性及效益分析[J]. 华东电力, 2005, 33 (11) : 20-23.

YANG Da-xiong, CHEN Yan. Characteristics of

time-of-use electricity price of Shanghai and benefits achieved[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (11) : 20-23.

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

程瑜(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为销售电价理论及方法, 电力经济分析;

翟娜娜(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力经济分析. E-mail: beibeina10@163.com

(上接第 207 页 continued from page 207)

[11] Nicholas W M, William W P, Juan J S. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine-generators [EB/OL]. (2003-10-27) [2010-3-15]. <http://www.easthavenwindfarm.com/filing/high/modeling.pdf>.

黄崇鑫(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统控制; E-mail: huangchongxin@gmail.com

张凯锋(1977-), 男, 副研究员, 研究方向为电力系统控制;

戴先中(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性控制、电力系统控制。

收稿日期: 2010-04-09

作者简介: