

具有限定功率运行的永磁直驱风力发电并网控制设计

任碧莹, 同向前, 孙向东

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 当风力发电或光伏电站这些间歇式可再生能源因外界环境影响而出力过高时, 会使得配网系统潮流发生变化, 并网处电压会超出运行的安全限值范围。为使系统处于可控范围, 可对这些能源进行实时容量限制。对直驱式永磁同步风力发电系统的控制策略进行了研究, 分析了风机输出功率曲线, 设计了最大风能跟踪和限定功率运行输出的控制方法和系统后级逆变并网控制方法, 使得风力发电系统具有最大功率跟踪或限定功率运行、并网有功/无功功率独立控制等功能。最后建立了风力发电并网系统仿真模型, 仿真结果对所设计控制策略进行了验证。

关键词: 风力发电; 最大风能跟踪; 限定功率运行; 并网控制

Grid-connected control design for directly-driven PM wind generation with limited power operation

REN Bi-ying, TONG Xiang-qian, SUN Xiang-dong

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: When the intermittent renewable energies, such as wind generation or PV plant, generate more powers under the condition of the environmental influence, the tidal current of the distribution network will change and the voltage at the connected-grid point may exceed the safe limited range. In order to avoid the above phenomenon, it could be done to limit the output energy for these power generation systems. The control methods for the directly-driven permanent magnet (PM) wind generation system are studied, output power curves of the wind turbine are analyzed, control methods of the optimal wind-energy tracking or limiting power operation and end-stage control strategy of the system are designed. This makes wind generation system and PV generation system have the functions of MPPT or limiting power operation, and independent control of grid-connected active power and reactive power. At last, the simulation model of wind generation system is built, and the control strategy is verified by the simulation results.

Key words: wind generation; optimal wind-energy tracking; limiting power operation; grid-connected control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0087-06

0 引言

目前风力发电主要集中在两个方向: 双馈感应发电技术和直驱式永磁同步发电技术^[1]。直驱式永磁同步发电技术中没有齿轮箱, 且在低风速情况下仍可高效发电, 同时低电压穿越时, 只需对并网控制采取相应的策略, 而不会影响到电机侧整流器以及电机系统的正常运行^[2]。无论双馈感应发电的变速恒频并网还是直驱式永磁同步并网通常采用最大风能跟踪方式输出最大能量^[3]。常规的最大风能捕获方法有: 最佳叶尖速比、功率反馈法、爬山搜索法等^[4]。

当风力发电这种间歇式可再生能源大规模接入电网时会带来一些问题, 比如: 增大调峰、调频难度, 电网电压控制难度加大, 可能会因为这些电源出力高而负荷需求较低情况下对配网渗透深, 进而对配网电能质量造成影响^[5]。对于大量的以普通异步发电机为对象的恒速恒频方式风力发电并网, 当风机出力越高, 其无功需求增大, 机端电压降低, 常采用无功补偿方式来调节电压。对于大容量的变速恒频双馈感应电机并网来说, 采用有功无功解耦控制方式可以使得该机组通过无功调节方式对电压控制^[6-8], 但是由于逆变器输出的无功功率调节范围有限, 当风电出力过高时, 并网点电压会越限。直驱式永磁同步发电风力系统通常采用单位功率因数并网, 注入电网的无功为 0。当系统输出最大功率超出本地负荷需求时, 会引起馈线潮流的倒送以

基金项目: 陕西省教育厅产业化项目 (2012JC17); 陕西省教育厅自然科学基金 (12JK0567); 教育部高等学校博士点专项科研基金 (20116118110006)

及馈线处的电压升高,甚至超出电压的安全限值。那么这些电源可以和储能装置相配合来吸纳过多的能量^[9-11],但是对于没有具备储能装置的直驱式风力发电系统,就要求风电场能够具有快速的有功功率调节能力,实现在高风速低负荷下对风电场输出有功功率的控制,提高风电场电压稳定性。文献[12]提出了两种风电受限容量的计算方法,在保证系统安全的情况下最大程度地降低风电功率受限量,降低弃风量。

基于此,在负荷较轻、可再生能源出力较大情况下,本文针对直驱式永磁同步风力发电系统,提出了通过限定该电源输出的有功功率来满足并网处电压不超过安全上限值的控制策略。分析了风机输出功率与电机电压角速度之间的数学关系,在此基础上根据功率变化和电机角速度变化之比关系,设计了最佳风能跟踪以及限定功率运行控制方法,研究了直驱式风机整流侧和逆变侧控制策略。最后采用 PSCAD 仿真软件搭建了风力发电并网系统,验证了所设计内容的正确性。同时本系统的限定功率控制策略也可应用于光伏功率跟踪运行控制上。

1 限定功率运行的直驱风力发电系统框图

本文所设计的具有限定功率运行的直驱式永磁同步风力发电系统框图如图 1 所示。

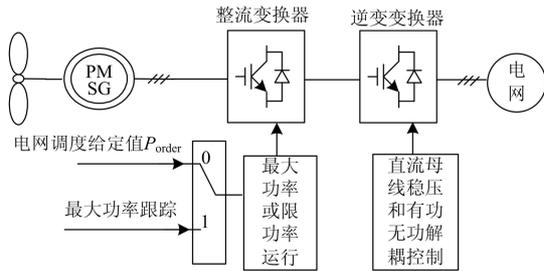


图 1 限定功率运行的风力发电系统框图

Fig. 1 Wind generation system scheme with limiting power operation

风力发电系统运行分为两种模式:电网调度模式 0 和最大功率跟踪模式 1。电网调度模式是指有电网调度给出风电限定输出功率。在此模式下风电系统按照限定功率值输出功率,确保其输出功率最大值不超过 p_{order} 。最大功率跟踪模式是指当电网调度未明确其限定功率值时,风机捕获当前最大风能并按最大功率输出注入电网。

直驱式风力发电拓扑结构通常有不可控整流+BOOST+逆变变换器和整流变换器+逆变变换器两种。针对整流变换器+逆变变换器全功率直驱式风

力发电结构来说,风力发电系统的整流变换器控制部分实现对同步发电机的控制,其实现目标是控制风力机的转速,使其捕获当前风速下的最大风能,获取最大输出功率或根据电网调度指令使其运行在限定功率值 p_{order} 之下;同时将永磁同步发电机发出频率和幅值变化的交流电整流成直流电。风机后级逆变器作用都是通过直流母线稳压实现将前级转换的功率传输到电网上,并实现有功功率和无功功率的解耦控制。

2 限定功率运行实现方法

对于风力发电不稳定的间歇式能源而言,因为风力发电输出功率是随外界环境变化而变化,其限定有功功率的输出要比稳定的分布式电源复杂,所以这里分两种情况:①实时检测当前功率输出,当限定有功功率高于当前最大功率输出时,按照最大功率跟踪输出;②当限定有功功率低于当前最大功率输出值时,需工作在限定功率运行状态下,即风力发电要按照给定功率参考值输出能量。所以要求系统不仅可运行在最大功率点上,也可运行在系统设定的限定功率点上。下面对风力最大功率运行和限定功率运行控制策略进行阐述。

风机捕获的风能 p_m 如式 (1) 所示。其中: ρ 为空气密度(kg/m^3); A 为桨叶扫掠面积,等于 π 与桨叶半径 R 平方的乘积;当桨距角固定时风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 的函数,此时存在一个最佳叶尖速比 λ_{opt} 对应于最大风能利用系数 $C_{p,opt}$ 。

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

当风力机运行在最佳叶尖速比时,同步电机输出电压角速度 ω_e 与风速 v 成正比,如式(2)所示。

$$v = \frac{R\omega_e}{p\lambda_{opt}} \quad (2)$$

式中, p 是同步电机极对数。将式 (1) 与式 (2) 结合,同时假设忽略定子铜耗和铁耗,发电机输出功率 p_w 可由式 (3) 描述。

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_{p,opt} \frac{R^3 \omega_e^3}{p^3 \lambda_{opt}^3} \quad (3)$$

式中的 p_w 与 ω_e 之间的关系可以用图 2 表示。

由图 2 可知,在某一特定风速下,不同的发电机角速度对应不同的发电机功率输出。当风机运行在某一风速下,发电机输出最大风能 $p_{w,o}$ 对应的电机输出电压角频率 $\omega_{e,o}$,因此若想获得最大风能利

步电机的电磁转矩方程为 $T_e = p\psi_f i_{rq}$ ，式中 ψ_f 为永磁体磁链， T_e 为电磁转矩。由此可以看出 T_e 与 q 轴电流 i_{rq} 成比例，那么通过调节 i_{rq} 来调节永磁电机电磁转矩，进而实现发电机输出有功功率的调节。

前级整流器控制系统采用转速外环控制、电流内环控制方式。其中转速外环控制可以实现发电机电子角速度 ω_e 跟踪由公式 (5) 算出的转速 $\omega_{e.ref}$ ，实现最大功率点跟踪或限定功率运行。

零 d 轴电流矢量控制方式下，d 轴参考电流 $i_{rd.ref}$ 为 0，可控制发电机输出无功为 0；转速控制环输出参考电流 $i_{rq.ref}$ ，通过对 q 轴电流 i_{rq} 的控制来实现对转矩的控制，忽略发电机定子电阻，该电流控制环可以通过公式 (6) 实现^[13]。

$$\begin{aligned} u_{rd} &= -\omega_e L_q i_{rq} + K_{p1}(i_{rd.ref} - i_{rd}) + K_{I1} \int (i_{rd.ref} - i_{rd}) dt \\ u_{rq} &= \omega_e L_d i_{rd} + \omega_e \psi_f + K_{p2}(i_{rq.ref} - i_{rq}) + \\ & K_{I2} \int (i_{rq.ref} - i_{rq}) dt \end{aligned} \quad (6)$$

式中： L_d 、 L_q 为电枢绕组 d、q 轴电感； u_{rd} 、 u_{rq} 为机侧整流器控制输出量； $K_{p1,2}$ 、 $K_{I1,2}$ 是电流内环比例调节增益和积分调节增益。通过对 dq 轴电流的 PI 调节控制，使其跟踪参考电流值，实现对发电机电磁转矩控制，进而调节发电机转速，并通过耦合项 $\omega_e L_d i_{rd}$ 和 $\omega_e L_q i_{rq}$ 以及前馈项 $\omega_e \psi_f$ 的补偿方法消除了 dq 轴之间的相互耦合。

逆变控制也采用双环控制，电压外环是将直流电压参考值与实际直流电压进行差值比较，经 PI 调节可以得出网侧 d 轴参考电流 $i_{id.ref}$ 。可以通过设定无功给定值 Q_{order} 与逆变实际输出无功比较后经 PI 调节器控制来获得 q 轴参考电流 $i_{iq.ref}$ ，当 Q_{order} 为 0 时，风机是单位功率因数并网。电流内环采用有功电流和无功电流解耦独立控制，其逆变器控制输出量 u_{id} 、 u_{iq} 的控制方程如式 (7) 所示。式中， ω 是电网锁相输出角频率， $\omega L_2 i_{sq}$ 和 $\omega L_2 i_{sd}$ 为解耦项， $K_{p3,4}$ 、 $K_{I3,4}$ 是电流内环比例调节增益和积分调节增益， u_{sd} 、 u_{sq} 是电网电压 dq 坐标系下的 dq 轴分量，通过电网电压 u_{sd} 、 u_{sq} 的前馈补偿可以克服由电网电压波动引起的扰动。

$$\begin{aligned} u_{id} &= U_{sd} - \omega L_2 i_{sq} + K_{p3}(i_{id.ref} - i_{id}) + K_{I3} \int (i_{id.ref} - i_{id}) dt \\ u_{iq} &= U_{sq} + \omega L_2 i_{sd} + K_{p4}(i_{iq.ref} - i_{iq}) + K_{I4} \int (i_{iq.ref} - i_{iq}) dt \end{aligned} \quad (7)$$

由于光伏输出功率与输出电压特性曲线也是一条类似于风机 p_w 与 ω_e 关系的曲线，其最大功率跟踪或限定功率运行同风机功率跟踪原理相似，所以本文所设计的具有限定功率运行控制策略同样可以应用于光伏并网发电系统。这里不再赘述。

4 仿真

采用 PSCAD 仿真软件，搭建了直驱式风力发电系统仿真模型。其中风力机参数：桨叶半径 28.5 m，桨距角 3° ，空气密度 1.1 kg/m^3 ；永磁同步电机的参数：定子电阻 $R=0.017 \text{ pu}$ ，极对数 $P=44$ ，定子 d 轴电感与定子 q 轴电感相等 $L_d=L_q=0.064 \text{ pu}$ ；直流侧电容 $47\,000 \text{ }\mu\text{F}$ ，交流侧电感 0.3 mH 。切入风速为 4 m/s ，额定风速为 12 m/s 。配电网电压 10 kV ，短路容量 100 MVA 。多台风机接在配电网馈线末端，其额定容量为 9 MVA ，限定有功功率为 7 MVA ，单位功率因数并网，即风机无功输出为 0 Mvar 。图 4 是在 2~5 s 时风速从 8 m/s 到 12 m/s 变化的阵风风速波形，图 5 是风机在最大功率跟踪运行下叶尖速比、风能利用系数、由转速控制环获得的 q 轴参考有功电流 $i_{rq.ref}$ (A)、注入电网的有功功率 (MW)、无功功率 (Mvar)、并网电流 (kA) 波形，可以看出风机功率输出能够跟随风速变化实现调整叶尖速比，使其获得最优风能利用系数，同时根据转速控制环实时调整有功电流分量使发电机输出最大功率。但是当其出力较高时会超出 10.7 kV ，引起并网处母线电压越上限，如图 6 所示。图 7 是采用限定功率方式下的系统输出有功功率、无功功率、并网电流波形。可以看出当风速较高时，风机输出限定在功率值 7 MVA 上。从图 8 可以看出由于风机输出有功限值的作用，此时的并网处电压有效值最高为 10.5 kV ，满足母线电压安全运行范围。

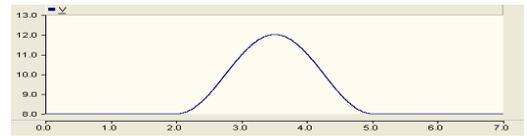
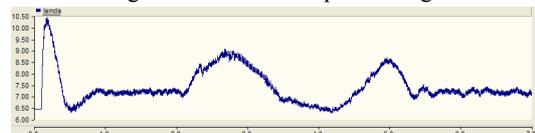
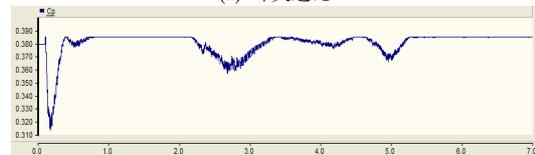


图 4 风速变化曲线

Fig. 4 Curve of wind speed change



(a) 叶尖速比



(b) 风能利用系数

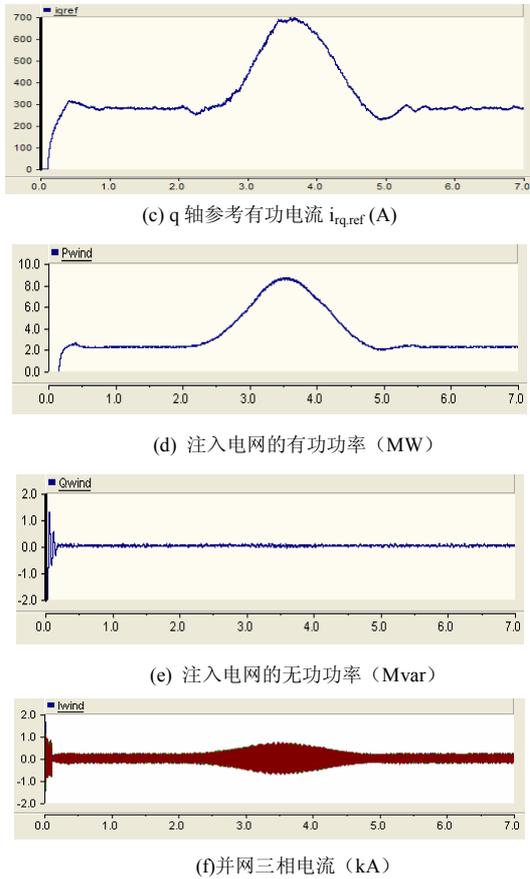


图 5 最大功率跟踪下的直驱式风力发电输出波形
Fig. 5 Output waveforms of directly driven wind generation with MPPT method (kA)

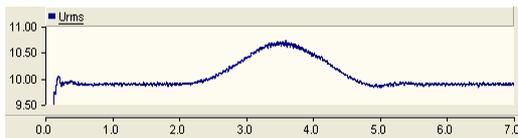


图 6 最大功率跟踪下运行的多台风机并网处电压有效值
Fig. 6 Grid-connected voltage with limiting power with MPPT method for multi-wind turbines (kV)

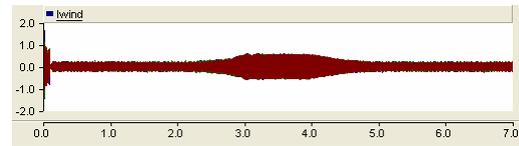
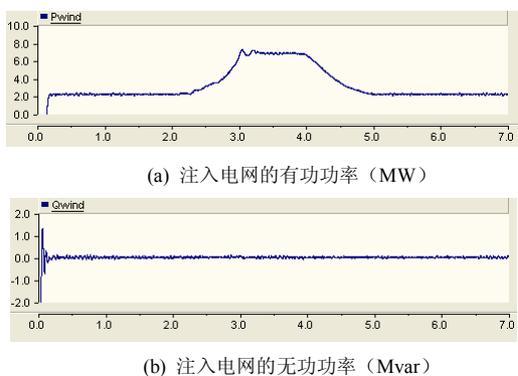


图 7 限定功率运行下的直驱式风力发电输出波形
Fig. 7 Output waveforms of directly driven wind generation with limiting power method

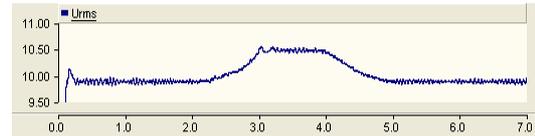


图 8 限定功率运行的多台风机并网处电压有效值 (kV)
Fig. 8 Grid-connected voltage with limiting power method for multi-wind turbines (kV)

5 结论

当直驱式风力发电和光伏发电系统因出力高而负荷需求低时, 会引起并网处馈线潮流倒送以及电压升高越限, 可通过对分布式电源进行限制出力来解决该问题。基于此, 本文提出了具有最大功率跟踪或限功率运行的永磁同步风力发电的整体运行控制策略, 详细研究了最大功率跟踪和限功率运行的原理, 搭建了永磁同步风力发电系统的仿真系统。仿真结果表明系统能够实时调整风机输出功率使其降低输出有功, 满足电压要求。该限功率运行控制策略也可应用于光伏发电系统中。

参考文献

- [1] 王文亮, 葛宝明, 毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.
WANG Wen-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43-48, 78.
- [2] 薛玉石, 韩力, 李辉. 直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 1-5.
XUE Yu-shi, HAN Li, LI Hui. Overview of direct-driven permanent magnet synchronous for wind power system[J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35(4): 1-5.
- [3] 孟克其劳, 陈虎. 永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22):

- 83-88.
- MENG Keqilao, CHEN Hu. Study on maximum power point tracking strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generating system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 83-88.
- [4] HUANG Ke-yuan, HUANG Shou-dao, SHE Feng, et al. A control strategy for direct-drive permanent-magnet wind-power generator using back-to-back PWM converter[C] // Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan: IEEE Press, 2008: 2283-2288.
- [5] 裴玮, 盛鹁, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
- PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [6] 余昆, 曹一家. 含分布式电源的地区电网无功电压优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 28-32.
- YU Kun, CAO Yi-jia. Reactive power and voltage optimization of the district grid with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 28-32.
- [7] 迟永宁, 刘燕华. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
- CHI Yong-ning, LIU Yan-hua. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [8] 黄学良, 刘志仁. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
- HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [9] 张坤, 毛承雄. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-15.
- ZHANG Kun, MAO Cheng-xiong. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 7-15.
- [10] 汪海琪, 白晓民, 许婧. 考虑风光储协调运行的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 13-21.
- WANG Hai-ying, BAI Xiao-min, XU Jing. Reliability assessment considering the coordination of wind power, solar energy and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 13-21.
- [11] 刘世林, 孙海顺, 顾明磊. 一种新型风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 248-253.
- LIU Shi-lin, SUN Hai-shun, GU Ming-lei. Novel structure and operation control of a flywheel energy storage system associated to wind generator connected to power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 248-253.
- [12] 陈建华, 吴文传, 张伯明. 风电受限态下的大电网有功实时控制模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 1-6.
- CHEN Jian-hua, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. An active power real-time control method for large power grid under wind power curtailment[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 1-6.
- [13] 赵梅花, 阮毅, 杨勇, 等. 直驱式混合励磁风力发电系统控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 19-24.
- ZHAO Mei-hua, RUAN Yi, YANG Yong, et al. Control strategy study on direct-driven type hybrid excitation wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 19-24.

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-07-20

作者简介:

任碧莹(1971-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电技术与微电网运行控制技术; E-mail: renby@126.com

同向前(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电和柔性交流输电技术等;

孙向东(1971-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为储能与新能源并网、交流变频控制技术等。