

# 直驱永磁同步风电系统低电压穿越的研究

杨晓萍, 段先锋, 田录林

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**[摘要]** 【目的】研究直驱永磁同步风电系统的控制策略,以提高其低电压穿越的能力。【方法】建立经背靠背双 PWM 变流器并网的直驱永磁同步风力发电系统的仿真模型,采用电流前馈控制实现两侧变换器的有功和无功功率的解耦控制。将电网电压信号引入机侧整流器参考功率的计算,提出按电网电压跌落幅度减小发电机输出功率的低电压穿越控制策略。【结果】仿真结果表明,电网电压跌落时,文章所提控制策略限制了变流器直流侧过电压和网侧逆变器过电流;辅以桨距角调节可以抑制发电机功率减小时机组机械转速的升高。【结论】保持发电机功率平衡和变流器直流侧功率平衡,可提高直驱永磁同步风电系统的低电压穿越能力,同时向系统提供无功功率支持,帮助电网电压恢复。

**[关键词]** 直驱式风力发电;永磁同步发电机;电压跌落;低电压穿越;无功补偿

**[中图分类号]** TM614

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2009)08-0228-07

## Low voltage ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator

YANG Xiao-ping, DUAN Xian-feng, TIAN Lu-lin

(Institute of Water Resource and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** 【Objective】 The control strategy for directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator (D-PMSG) was investigated to enhance its capacity of low voltage ride through (LVRT). 【Method】 A D-PMSG model comprising of a host AC power grid with two back-to-back PWM voltage source converters (VSCs) and a common DC link was established. The active and reactive powers of the two VSCs were independently controlled by the PI current controllers with feedforward decoupling. The real-time grid voltage was introduced into the reference power calculation of gen-side rectifier. The control strategy with reducing generator power based on the ratio of actual and rated grid voltage was proposed. 【Result】 Simulation results showed that during voltage dip, the proposed strategy could limit both the DC voltage and inverter current. The rotational speed was limited at its reference by pitch angle controller. 【Conclusion】 The power balance of generator and DC-link of the converters could be maintained through the employment of the proposed control strategy, thus the LVRT capacity of D-PMSG was enhanced, and the reactive power to the grid could also be supplied.

**Key words:** directly driven wind turbine; permanent magnet synchronous generator (PMSG); voltage dip; low voltage ride-through; reactive compensation

风能电力在电网供电中的比重逐年上升,因此 必须考虑电网故障时风机的各种运行状态对电网稳

\* [收稿日期] 2008-12-02

[基金项目] 国家自然科学基金项目(90410019)

[作者简介] 杨晓萍(1964—),女,陕西蒲城人,副教授,博士,主要从事电力系统运行与控制及电力电子在电力系统中的应用研究。  
E-mail: yangxiaoping@xaut.edu.cn

定性的影响。电网故障引起电压跌落会带来一系列暂态过程,如过电压、过电流或转速升高等。风力发电机组在这种情况下立即解列以自我保护。当风电在电网中占有较大比例时,这种自我保护式解列会增加系统恢复难度,甚至使故障恶化。新的入网规则要求,电网电压跌落时,风力发电机应不脱网运行,向电网提供无功功率,直到电压恢复,这就是低电压穿越(Low voltage ride through, LVRT)<sup>[1]</sup>。风力发电技术领先的国家,如丹麦和德国等已经相继发布了风力发电系统低电压穿越的定量标准<sup>[2]</sup>。因此,研究风电系统的低电压穿越具有现实意义。

直驱永磁同步风力发电系统(Directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)以其结构简单、维护成本低、可靠性高等优点代表了风力发电未来的发展方向<sup>[3]</sup>。已经证明,D-PMSG 具有很好的低电压穿越能力<sup>[4]</sup>。文献[5-6]分析了电网电压跌落对逆变器的影响。当电网电压跌落时,网侧逆变器输出功率减小,发电机输出功率不变,这种功率不平衡导致直流电压上升,危及电力电子器件的安全。如果控制直流电压稳定,则必然引起网侧逆变器电流的激增,同样也会损坏电力电子器件。文献[4,7]在直流环节加装耗能电阻或储能系统,在电压跌落时,将逆变器电流限制所致的直流侧多余能量消耗或储存起来,防止直流电压升高,从而实现低电压穿越。文献[8]通过在网侧逆变器交流侧加装带通滤波器,以滤除电网电压不对称时的负序电压,使逆变器交流侧只有正序电压,以实现电网电压不对称跌落的穿越。综上所述,上述这些方法都要增加专门元件,降低了系统的可靠性和经济性,同时也使控制变得更为复杂。文献[9]研究了 D-PMSG 各部分的控制方法,提出了结合桨距角控制提高其低电压穿越能力的必要性。

针对上述问题,本文分析了电压跌落对风电系统的影响和风力机的输出功率特性,将电网电压信号引入机侧整流器功率外环参考功率的计算。电网电压跌落时,按电压跌落幅度减小发电机输出功率,防止网侧逆变器过电流和直流过电压;辅以桨距角控制,减小风力机输出功率,防止机组超速。基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/ EMTDC 对这一控制策略进行仿真研究,验证其正确性和有效性,以期直驱永磁同步风力发电系统低电压穿越能力的提高提供技术支持。

## 1 低电压特性分析

### 1.1 电网电压跌落对风电系统的影响

本文采用的直驱永磁同步风力发电系统如图 1 所示,其中的风力机直接驱动永磁同步发电机经背靠背双 PWM 变流器并入电网。

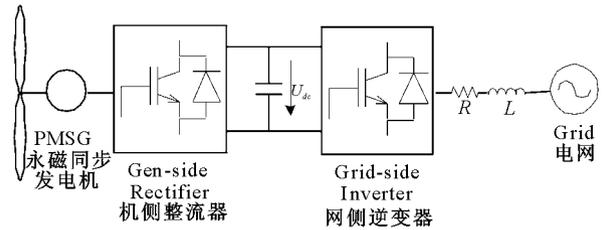


图 1 经背靠背 PWM 变流器并网的直驱永磁风力发电系统

Fig. 1 Directly-driven PMSG wind turbine connected to grid by back-to-back converter

风力发电系统注入电网的功率  $P_e$  可由式(1)表示<sup>[10]</sup>:

$$P_e = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1)$$

式中: $u_a, u_b, u_c$  与  $i_a, i_b, i_c$  分别为电网三相的瞬时电压和电流。转换到两相同步旋转坐标系,则式(1)可以表示为:

$$P_e = u_d i_d + u_q i_q \quad (2)$$

式中: $u_d, u_q$  与  $i_d, i_q$  分别为电网电压与电流的  $d, q$  轴分量。

取  $q$  轴与电网电压矢量方向一致, $d$  轴落后其  $90^\circ$ , 则  $u_d = 0$ , 于是式(2)可以化简为:

$$P_e = u_q i_q \quad (3)$$

电压跌落时,假定逆变器工作于单位功率因数且已经达到额定电流, $i_q$  被限制不能增加。这时,注入电网的有功功率下降,并且下降幅度与电压跌落幅度一致,其表达式为:

$$P_f = u_{qf} i_q = u_q i_q \cdot \frac{u_{qf}}{u_q} = P_e \cdot \frac{u_{qf}}{u_q} \quad (4)$$

式中: $P_f, u_{qf}$  分别为电压跌落后注入电网的功率和  $q$  轴电压。在直流侧,由于发电机输出功率没有减小,导致功率不平衡引起直流电压升高,危及变流器电力电子器件的安全。通过控制减少发电机输出功率  $P_g$  使得  $P_g = P_f$ , 就可保持直流侧功率平衡,限制直流电压升高,实现风电系统的低电压穿越。

### 1.2 风力机功率-转速曲线

根据贝兹理论<sup>[11]</sup>,风力机从空气中吸收的功率  $P_w$  为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p. \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风力机风轮半径;  $V$  为风速;  $C_p$  为风力机风能利用系数, 是叶尖速比  $\lambda$  和桨叶桨距角  $\beta$  的函数。风速不变时, 功率  $P_w$  是  $C_p$  的比例函数。

对  $\lambda$ , 有:

$$\lambda = \omega R / V. \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为风力机机械角速度。则:

$$C_p = 0.73 \times \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.02\beta^2 - 13.2 \right) \cdot \exp\left(\frac{-18.4}{\lambda_i}\right). \quad (7)$$

其中  $\lambda_i = 1 / \left[ \frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.03}{\beta^2 + 1} \right]$ 。

图 2 是风速不变时, 风力机风能利用系数与转速  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的关系。

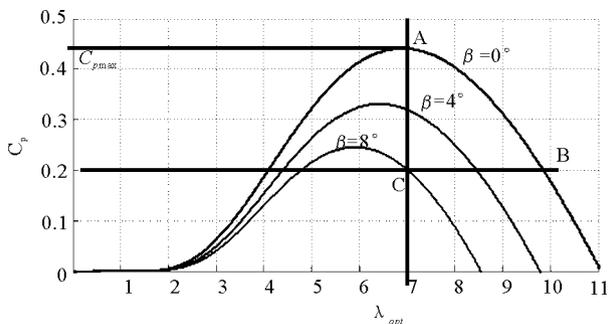


图 2 风力机功率特性曲线

Fig. 2 Power characteristics of a windmill

从图 2 可知, 对每一个桨距角  $\beta$  都对应一条风力机  $C_p - \lambda$  曲线, 每一条曲线都有一个  $C_p$  最大值的叶尖速比  $\lambda$ 。桨距角为 0 时可以获得最大的风能利用系数  $C_{pmax}$ , 如图 2 中的点 A, 对应的叶尖速比为最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$ 。

在额定风速以下正常运行时, 为了从空气中最大限度地吸收能量, 风力机桨距角被控制在  $\beta = 0^\circ$ , 且以最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$  在点 A 稳定运行<sup>[12]</sup>。此时输出功率  $P_w$  等于最大功率  $P_{max}$ 。如果不考虑损耗,  $P_{max}$  也就是注入电网的功率  $P_e$ 。

电压跌落时, 假定风速不变, 按电压跌落幅度控制发电机输出的有功功率  $P_g = P_f$ , 此时, 由于惯性, 风力发电机还运行在最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$ , 如果不进行桨距角调节, 由于这时风力机输出的功率  $P_w$  仍为  $P_{max}$ , 大于  $P_g$ , 发电机开始加速, 离开最佳运行点 A, 其输出功率  $P_w$  逐渐减小; 当减小到  $P_w = P_g$  时, 发电机停止加速, 稳定运行在点 B。当电网电压恢

复时, 控制发电机输出功率恢复为  $P_{max}$ , 这时  $P_g$  大于  $P_w$ , 发电机又开始减速, 沿  $C_p - \lambda$  曲线从点 B 回到点 A 正常运行。但这种方法会导致转速过高。如果进行桨距角调节, 在保持转速不变的同时减小  $P_w$ , 运行点由  $\beta = 0^\circ$  曲线上的点 A 变化到  $\beta = 8^\circ$  曲线上的点 C 运行。在电网电压恢复时, 再控制桨距角和发电机功率, 使运行点由点 C 回到点 A 运行。这相当于汽轮机调节汽门以减小原动机输出功率。在这个过程中, 保持了发电机功率平衡和变频器的功率平衡, 防止了发电机转速和变频器直流电压的升高。

## 2 控制策略

### 2.1 桨距角控制

变桨距风机比定桨距风机在技术上更具优势, 也是当前风力机普遍采用的技术。如前所述, 桨距角对  $C_p$  影响较大, 调节桨距角即可调节风电机组的功率。

图 3 是本文采用的桨距角控制器<sup>[11]</sup>, 图中  $\omega_{ge}$ 、 $\omega_g$  分别为发电机额定和实际角速度;  $P_{ge}$ 、 $P_g$  分别为发电机额定功率和实际功率;  $K$  为比例调节器。如图 3 所示, 对桨距角  $\beta$  的调节分为两路: 一路对机组机械转速和其额定转速的差值进行 PI 调节; 另一路对机组功率与额定功率的差值进行比例调节, 当机组功率大于额定功率时起作用。这样, 在机组转速不等于额定转速或发电机功率超过额定功率时, 控制器增大桨距角以减小机组风能利用系数  $C_p$ , 从而保持机组转速和功率不超过额定值。

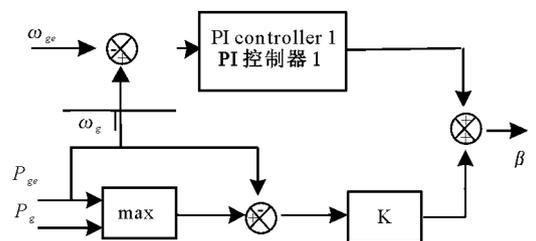


图 3 桨距角控制器的控制分析

Fig. 3 Analysis of pitch angle aontroller

### 2.2 机侧整流器的控制

机侧整流器的控制, 就是通过控制发电机定子电流, 调节发电机电磁转矩  $T_e$ , 进而控制发电机的转速。在  $dq$  两相同步旋转坐标系中,  $q$  轴定向于发电机感应电动势空间矢量, 并假定发电机  $d$ 、 $q$  轴电感相等, 基于此建立的永磁同步发电机的数学模型为<sup>[13]</sup>:





图 7 所示为控制发电机功率的同时进行桨距角控制的仿真结果。图 7(a)是电网电压有效值变化波形。图 7(b)、(c)、(f)分别为电压跌落期间变流器的直流电压、逆变器电流和机组转速波形,在电压跌落时,发电机功率不能突变,变流器输入功率大于输出功率,直流电压上升。随后机侧整流器控制减小发电机输出功率,维持变流器功率平衡,限制直流电压升高;对发电机而言,输入机械功率大于输出电功

率,机组转速升高。这时桨距角控制器增大了桨距角,减小了输入发电机的机械功率,使发电机的功率维持平衡,并可使机组转速升高不超过 1%。图 7(d)表明,电压跌落期间风力机风能利用系数被减小了。图 7(g)表明,电压跌落期间 D-PMSG 向系统输送了一定的无功功率。电网电压恢复后,系统又恢复正常运行。

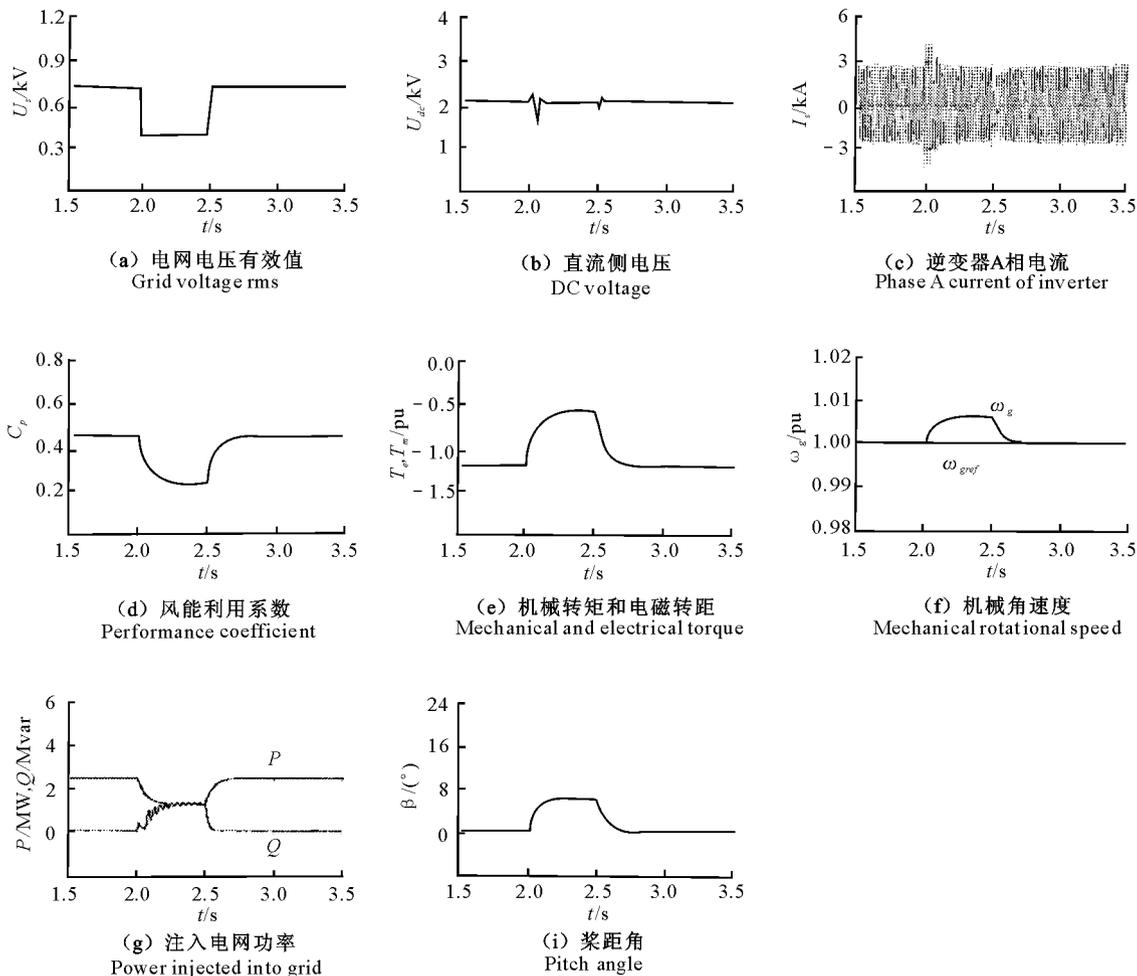


图 7 有桨距角控制的仿真结果

Fig. 7 Simulation results with pitch control

## 4 结 语

面对新的入网规则要求,为了解决电网电压跌落对直驱永磁同步风电系统的影响,本研究提出将电网电压信号引入机侧整流器的控制,并辅以桨距角控制,使发电机参考功率对电压跌落作出主动反应,保持变流器直流环节的功率平衡以限制直流电压和逆变器电流的升高。仿真结果表明,所提出的控制策略在电网电压跌落时,能有效抑制逆变器过流和直流侧过电压,提高 D-PMSG 的低电压穿越能

力。在不增加任何装置的情况下,通过功率控制和桨距角控制,这种低电压穿越的控制策略有效提高了直驱永磁同步风力发电机的低电压穿越能力,而且并未降低风力发电系统的可靠性和经济性。

## [参考文献]

[1] 张 兴,张龙云,杨淑英,等. 风力发电低电压穿越技术综述 [J]. 电力系统及其自动化,2008,20(2):1-8.  
Zhang X,Zhang L Y,Yang S Y, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(2),1-8. (in Chinese)

- [2] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. Wind-turbine fault ride through enhancement [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 1929-1937.
- [3] 张春晖. 大型风电设备发展的新方向——定子超高压转子永磁化 [J]. *电器工业*, 2007(7): 48-50.  
Zhang C H. The development direction of large wind generation equipments [J]. *China Electric Equipment Industry*, 2007(7): 48-50. (in Chinese)
- [4] Abbey C, Li W, Owatta L, et al. Power electronic converter control techniques for improved low voltage ride through performance in WTGs [C]// 37th Power Electronics Specialists Conference. South Korea: PESC 06 IEEE, 2006: 1-6.
- [5] Ottersten R, Petersson A, Pietilainen K. Voltage sag response of PWM rectifiers for variable-speed wind turbines [EB/OL]. (2004-06) [2008-09]. WWW. elkraft. ntnu. no/norpie/10956873/Final%20Papers/044%20-%20Andreas%20Petersson. pdf.
- [6] Duran-Gomez J L, Enjeti P N, Woo B O. Effect of voltage sags on adjustable-speed drives: A critical evaluation and an approach to improve performance [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, 35(6): 1940-1949.
- [7] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析 [J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(17): 73-77.  
Hu S J, Li J L, Xu H H. Analysis on the low voltage ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines [J]. *Automation of Electric Systems*, 2007, 31(17): 73-77. (in Chinese)
- [8] Fatu M, Lascu C, Andreescu G-D, et al. Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSG for wind turbines [C]// 42nd Industry Applications Society Annual Meeting. New Orleans: IEEE Industry Applications Society, 2007: 171-178.
- [9] Morren J, Pierik J T G, De Haan S W H. Voltage dip ride through control of direct-drive wind turbines [C]// 39th International Universities Power Engineering Conference. Bristol, UK: University of the West of England, 2004: 1346-1350.
- [10] Yongsug S, Lipo T A. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(3): 1530-1540.
- [11] Nicholas P W S, Dragon Jovicic. Dynamic modeling, simulation and analysis of an offshore variable-speed directly-driven permanent-magnet wind energy conversion and storage system (WECSS) [C]// OCEANS 2007-Europe. Aberdeen, Scotland: IEEE Oceanic Engineering Society, 2007: 1-6.
- [12] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(20): 62-67.  
Liu Q H, He Y K, Zhao R D. The maximal win-energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation systems [J]. *Automation of Electric Systems*, 2003, 27(20): 62-67. (in Chinese)
- [13] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略 [J]. *电网技术*, 2007, 31(15): 61-65.  
Yin M, Li G Y, Zhang J C, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. *Power System Technology*, 2007, 31(15): 61-65. (in Chinese)
- [14] 瞿兴鸿, 廖勇, 姚骏, 等. 永磁同步风力发电系统的并网变流器设计 [J]. *电力电子技术*, 2008, 42(3): 22-24.  
Qu X H, Liao Y, Yao J, et al. Design of grid-connected converter for a permanent magnet synchronous direct-drive wind power generation system [J]. *Power Electronics*, 2008, 42(3): 22-24. (in Chinese)
- [15] Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos C. Control of permanent magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(1): 130-135.
- [16] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
Zhang C W, Zhang X. PWM Rectifier and Control [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)