

# 兆瓦级直驱永磁风电系统低电压穿越研究

刘胜文<sup>1</sup>,包广清<sup>1</sup>,范少伟<sup>1</sup>,刘峻<sup>2</sup>,李正元<sup>2</sup>

(1.兰州理工大学 电信学院,甘肃 兰州 730050;2.甘肃电力科学研究院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**通过对兆瓦级直驱式永磁同步风力发电机(PMSG)系统低电压穿越能力的研究,提出一种改进的直流母线电压控制策略。该策略通过调节直流电流和控制发电机的输出功率,抑制直流母线动态过电压。与传统控制策略相比,该策略中升压斩波变换器采用电流内环、直流母线电压外环的双闭环控制结构;网侧逆变器采用电流内环和转速外环的双闭环控制结构。仿真结果表明,该控制策略可有效提高PMSG系统的低电压穿越能力。

**关键词:** 永磁同步风力发电机;电压跌落;低电压穿越;直流母线电压控制

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1004-9649(2011)02-0069-05

## 0 引言

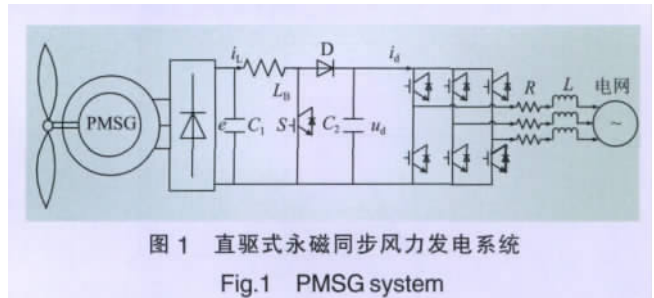
世界风电市场发展迅猛,使风电系统对电网的影响已不容忽略。各国电网公司根据自身实际对风电并网提出了严格的技术要求<sup>[1]</sup>,其中低电压穿越能力(LVRT)被认为是其最大挑战,直接关系到风力发电机组的大规模应用<sup>[2-3]</sup>。

直驱式永磁同步风力发电机(PMSG)因省去了齿轮箱,无电刷和滑环,得到广泛应用<sup>[4]</sup>。目前PMSG实现LVRT的主要措施有<sup>[5-7]</sup>:(1)选择耐压和过流值比较大的电力电子器件;(2)增加辅助网侧变流器;(3)在DC-link上接储能系统或Buck变换器。上述措施需要改变或增加器件,增加系统成本,并给系统带来空间安装及散热设计等问题。在此,本文对直流母线电压进行调节,通过功率变换将系统输入和输出不平衡的能量转化为风力机和发电机转动的动能,从而提高低电压穿越能力。

## 1 电网电压跌落对风电系统的影响

本文采用图1所示的“不可控整流+直流升压+PWM(脉宽调制)逆变”型电力电子变换器,具有结构简单、成本较低等优点,适合大功率场合的应用。

当电网电压跌落时,升压斩波变换器的功能仍在于保持PMSG的正常运行;而电网逆变器因为电流不能突变,注入电网的功率 $P_{grid}$ 迅速减小,为了传递等量的有功,逆变器会增大输出电流;但电压跌落到一定程度时,电流参考值将被限幅,使 $P_{grid}$ 增大



受到限制。忽略发电系统功率损失和贮存在 $C_1$ 上的功率,由下式可知,当电容 $C_2$ 两侧输入功率大于输出功率时, $u_{dc}$ 上升,影响系统的正常运行<sup>[5,7]</sup>:

$$P_{gen} - P_{grid} = P_c = u_{dc} C_2 \frac{du_{dc}}{dt} \quad (1)$$

式中: $P_{gen}$ 为发电机输出有功功率; $P_c$ 为贮存在电容 $C_2$ 功率; $u_{dc}$ 为直流母线电压。本文采用的控制策略,是通过减少发电机的输出功率,减小直流侧过电压,从而有效提高直驱型风力发电系统低电压运行能力。

## 2 风力机模型

PMSG系统中风力机特性的简化数学模型为<sup>[9-10]</sup>:

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\theta, \lambda) \\ \lambda = \omega_w R / v \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_w$ 为风能利用功率; $\rho$ 为空气密度; $R$ 为风叶半径; $\omega_w$ 为风力机转速; $v$ 为风速; $C_p$ 为风能利用系数; $\lambda$ 为叶尖速比。

收稿日期: 2010-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877034)

作者简介: 刘胜文(1984—),男,广西桂平人,硕士研究生,从事电网故障下PMSG不间断运行方面的研究。

E-mail: shengwen511@sina.com

风能利用系数的定义为:

$$C_p = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.58\theta - 0.002\theta^{1.4} - 13.2 \right) e^{-18.4/\lambda_i} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.002\theta} - \frac{0.003}{\theta^3 - 1}$$

图 2 为风速不变时,风力机的  $C_p-\lambda$  曲线。

由图 2 可知,每个桨距角都对应一条风力机  $C_p-\lambda$  曲线。在额定风速以下且风力机正常运行时,为达到最大风能利用率  $C_{p-\max}=0.44$ ,风力机桨距角控制在  $\theta_1=0^\circ$ ,以叶尖速比为  $\lambda_{opt}=6.9$  在 A 点稳定运行。当电网电压跌落或风速过高,致使转速高于额定转速时,为了保证风电机组正常并网,需降低风力机的输出功率,风力机应脱离 A 点运行,降低风能利用系数。综上可得转子速度和风力机输出功率的关系如图 3 所示<sup>[9]</sup>。

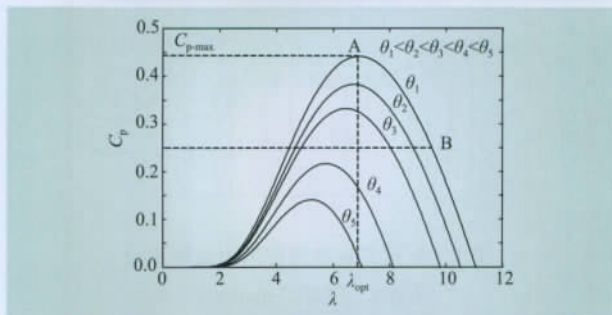


图 2 风力机  $C_p-\lambda$  曲线

Fig.2 Power coefficient  $C_p$  versus tip-speed ratio  $\lambda$

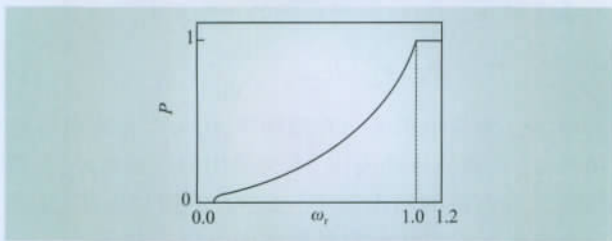


图 3 最佳转速与功率特性

Fig.3 Optimal rotor speed versus power output

### 3 控制策略

#### 3.1 升压斩波变换器的控制

发电机发出的交流电经过二极管整流,为了扩大风力机的低速运行范围,在直流母线上引入升压斩波(Boost)变换器,且可以通过相应的控制提高直流母线电压(DC-link)上功率因数,其数学表达式如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\alpha}{L_B} \\ \frac{1-\alpha}{C_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ i_{dc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 为器件的占空比; $L_B$ 为发电机整合电感。

传统低电压穿越的控制方法中<sup>[12]</sup>,Boost 变换器采用双闭环控制,电流  $i_L$  为内环,转速为外环。如图 3 最大风能跟踪原则中功率和风机参考转速的关系,根据发电机转速得到最大功率参考值  $P^*$ 。由发电机输出功率的偏差,经 PI(比例积分)调节,可得到  $i_L^*$ ,如图 4 虚线方框 1 所示。通过电流  $i_L$  反馈,可调节发电机的电磁转矩  $T_e$ ,使得发电机能跟踪最佳的转速参考值。当电网电压跌落时,由于发电机转速输入量没有变化,Boost 变换器仍然是维持发电机最大功率输出,直流母线电压上升。

为了维持 DC-link 上的电压  $u_{dc}$  为一定范围值,本控制策略中的 Boost 变换器采用电流  $i_L$  为内环、直流母线电压  $u_{dc}$  为外环的双闭环控制。以 DC-link 上的额定电压为电压参考值,实际的  $u_{dc}$  为负反馈,如图 4 实线方框 2 所示。电网电压跌落后,直流母线电压上升,由于  $u_{dc}$  的负反馈,Boost 变换器会减小电流  $i_L$ ,降低发电机的输出功率,通过式(1), $u_{dc}$  得到了有效的抑制。而由于风力机没有采取特别的措施,这时风能利用功率  $P_w$  仍为  $P_{w-\max}$ :

$$P_w - P_{gen} = P_m = \omega_w J \frac{d\omega_w}{dt} \quad (5)$$

式中: $P_w$ 为风力发电机组的加速功率; $J$ 为惯性常量。该控制策略会使得风力机的转速升高,但随着风力机的加速,其离开最佳运行点 A(见图 2), $P_w$  逐渐减小,当减小到  $P_w = P_{gen}$  时,风力机停止加速,稳定运行在点 B。

#### 3.2 逆变器的控制

电压源 PWM 逆变器(VSC)由 IGBT(绝缘栅双极晶体管)和二极管组成各路的开关器件。逆变器的数学模型为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} u_{sd} = -Ri_{sd} - L \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_g Li_{sq} + e_{sd} \\ u_{sq} = -Ri_{sq} - L \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_g Li_{sd} + e_{sq} \\ C_2 \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{di_{sd}}{u_{dc}} i_{sd} + \frac{u_{sq}}{u_{dc}} i_{sq} - i_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{sd}$ 和  $u_{sq}$ 分别为逆变器的  $d$ 、 $q$  轴的电压分量; $i_{sd}$ 和  $i_{sq}$ 分别为逆变器的  $d$ 、 $q$  轴的电流分量; $e_{sd}$ 和  $e_{sq}$ 分别为电网电压的  $d$ 、 $q$  轴分量; $\omega_g$ 为电网角频率。

传统的控制方法中,逆变器采用电流调节,通过 DC-link 上的电压负反馈,平衡 DC-link 上输入输出功率,保持 Boost 变换器的输出电压在一定合适的值<sup>[9]</sup>,如图 4 中虚线方框 3 所示。

在本文的控制策略中,逆变器采用电流与转速的双闭环控制,其目的是能根据风能捕获原则输出最佳功率,即把传统的控制方法中 Boost 变换器控制目标由逆变器实现。通过转速环控制风力机运行在最优叶尖速比,使系统输出最大的能量,如图 4 中实线方框 4 所示。

$q$  轴电流参考值  $i_{sq}^*$  由式 (7) 获得:

$$i_{sq}^* = \min(2Q/3u_{sd}, \sqrt{i^2 - i_{sd}^2}) \quad (7)$$

式中:  $Q$  为需要输出的无功功率,  $i$  为逆变器允许流过的最大电流值。

当电网电压跌落时, 在本文的控制策略中, 逆变器最终以电流的限幅值输出有功功率和无功功率, 当电网电压恢复后,  $P_{grid}$  增大, 这时  $P_{gen}$  小于  $P_{grid}$ , 由式 (1),  $u_{dc}$  会减小, Boost 变换器会增大电流  $i_L$ , 增加  $P_{gen}$ , 由式 (5) 发电机开始减速, 逆变器输出最佳功率, 使风力机沿  $P_p-\lambda$  曲线从点 B 回到点 A 正常运行。

### 3.3 桨距角控制

当并网点电压跌落时间比较长时, 或风速高于额定风速时, 发电机的转速会过高, 需要引入桨距角的控制来调节发电机的机械转矩, 防止发电机组超速。桨距角的控制是在高转速的情况下采用的(见图5),  $C_p(\lambda, \theta)$  将随着桨距角  $\theta$  的控制而变化,  $P_{gen}$  因而能保持在额定功率。

## 4 仿真与系统电压跌落特性分析

根据风电场多个机组并联运行的特点, 本文采用 MATLAB/SIMULINK 仿真并以图 1 所示系统为模型(风力机额定容量为 2 MW, 共有 5 台机组并联在一起连接到电网), 对上述传统的和本文提出的 2

种控制策略进行仿真。假定电网电压在 0.03 s 时跌落至额定电压的 15%, 此时风速为 15 m/s, 图 6 中 a) 是在传统的控制策略和本文提出控制策略下电网电压的变化。

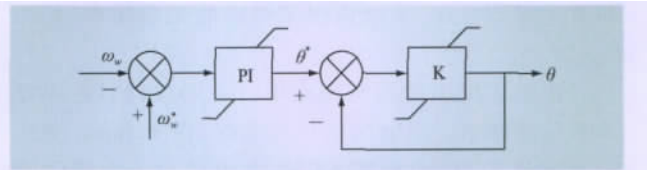


图 5 桨距角控制结构

Fig.5 Pitch angle controller

仿真参数如下: (1) 风力机: 空气密度  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 风轮半径 40 m, 额定风速 11 m/s; (2) PMSG: 极对数 40, 定子线电压 730 V, 机组转动惯量 4.32, 磁感应强度  $1.2 B_{pn}$ , 定子相电阻为  $0.006 R_{sn}$ , 交轴电感为  $1.305 X_{qpn}$ , 直轴电感为  $0.474 X_{qpn}$ , 额定转速 2.5 rad/s; (3) Boost 变换器: 电感 0.001 H, 电容  $C_2$  为 0.09 F, 开关频率 2 kHz, 母线额定电压 1 100 V, 限定电压 1 300 V; (4) VSC: 电感  $0.15 X_{pn}$ , 电阻  $0.15/50 R_{pn}$ , 输出额定电压 690 V, 输出的限定电流  $1.1 i_{qpn}$ , 无功设定值 0。

由图 6 b)~e), 在传统的控制策略中, 在电网电压跌落瞬间  $P_{grid}$  迅速减小, 此时  $P_{gen}$  基本不变。这会造成系统的输出功率和发电机的输出功率不平衡, 导致更多的能量储存在 DC-link 的电容  $C_2$  上, 使  $u_{dc}$

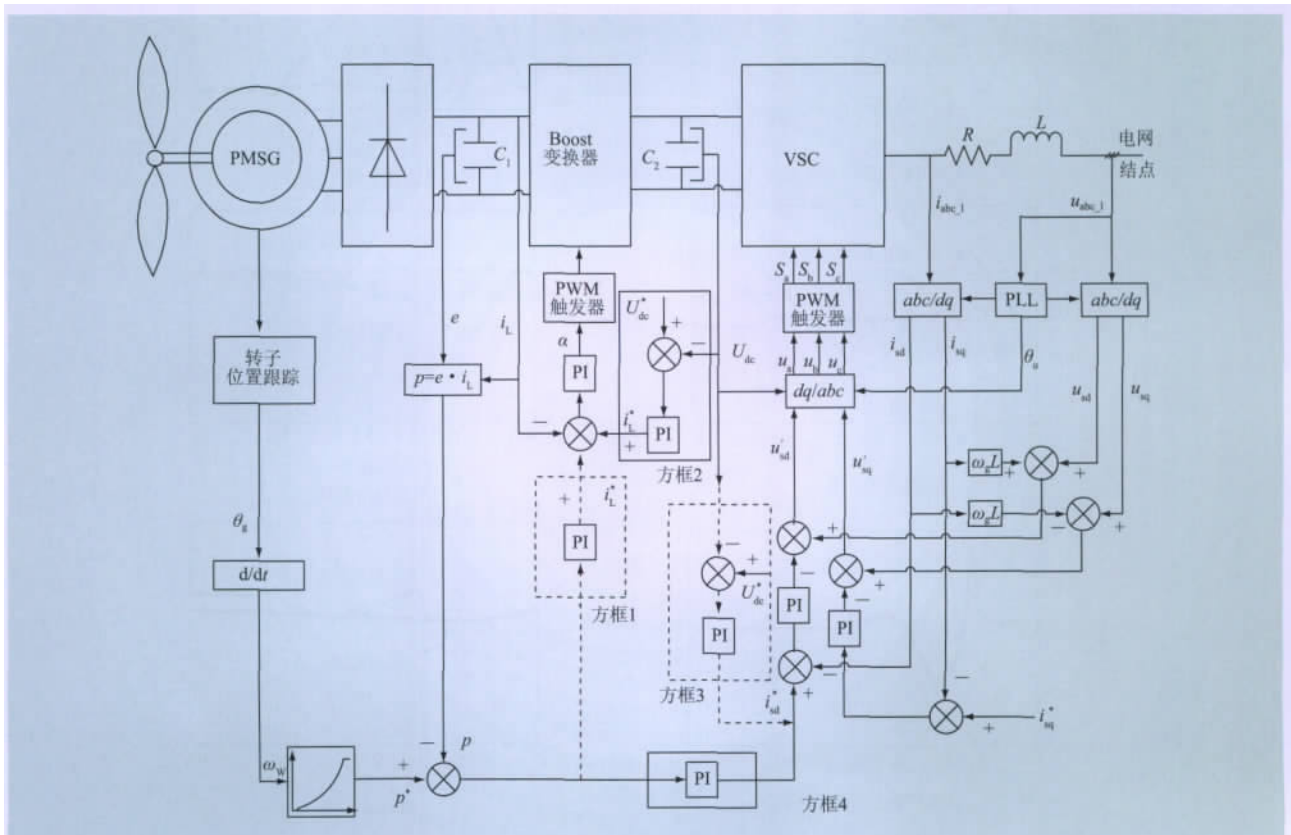


图 4 功率变换器控制结构

Fig.4 Power converter control structure



升高,致使  $u_{dc}$  超出母线电压的限定值,对变换器和逆变器造成损坏。另外,由于发电机的输出功率基本不变,由式(5),风机转速基本不变,从而风机的风能利用系数基本不变(见图 5 f)。在故障过程中,为了调节并网点电压,系统提供了一定的无功功率,如图 6 g)所示。

在本文提出的控制策略中,主要强调对直流母线电压的调节。当电网电压跌落时,由于 Boost 变换器的调节,  $i_L$  减小(见图 6 h)),发电机输出功率因而变小(见图 6 c)),通过式(1),  $u_{dc}$  比传统控制的  $u_{dc}$  上升值小了很多,如图 6 d)所示。然而根据式(5),由

于功率不平衡,会使一部分的能量存储在风力机和发电机上,造成风力机的转速  $\omega_w$  上升,但上升的幅度在  $0.06 \omega_{wpu}$  内(见图 6 e))。另外,由于转速升高和桨距角的控制,根据风能跟踪原则,风力机的风能利用系数变小(见图 6 f))。在上述 2 种控制方法中对无功功率的控制采用相同的方法,无功功率输出基本上没有变化(见图 6 g))。当电网电压恢复后,系统逐渐恢复正常。

仿真表明,当电网故障引起电压的大幅跌落时,采取本文控制策略能有效地抑制直流母线上的电压,从而提高其低电压穿越的能力,保证风电系统能

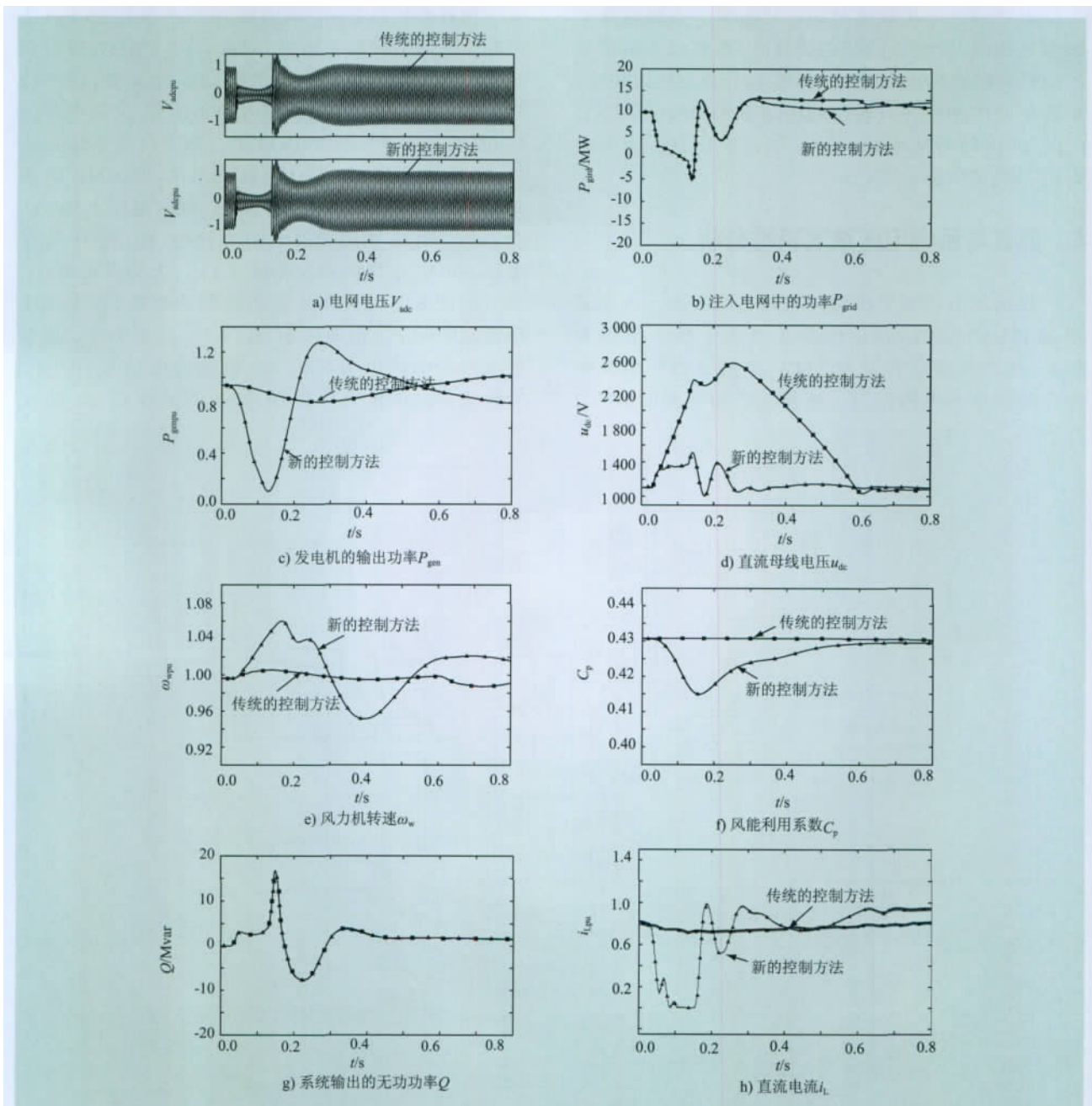


图 6 电网电压骤降下传统的和新的控制的仿真对比

Fig.6 Simulation comparison of traditional and new control under grid voltage dip fault

够安全有效地渡过电网故障。

## 5 结语

针对典型的直驱式永磁同步风力发电系统,本文在传统功率变换器控制策略的基础上,提出一种改进的直流母线电压控制策略,通过升压斩波变换器调节直流母线电压,并用逆变器实现从风能中跟踪最大的功率。通过 MATLAB/SIMULINK 的仿真表明,本文提出的控制策略能够有效地提高直驱式永磁同步风力发电机的低电压穿越能力,但与传统的策略相比,电网电压恢复时,系统输出的功率波动稍大。若在逆变器电网侧引入静止同步无功补偿器(STATCOM),稳定网侧电压,则将进一步提高发电机组低电压穿越的能力。

## 参考文献:

- [1] 关宏亮,赵海翔,王伟胜. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报,2007,22(10):173-177.  
GUANG Hong-liang, ZHAO Hai-xiang, WANG Wei-sheng. LVRT capability of wind turbine generator and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 173-177.
- [2] 范高锋,赵海翔. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略[J]. 电网与清洁能源,2008,24(1):44-47.  
FAN Gao-feng, ZHAO Hai-xiang. The impact and countermeasure of large scale wind power on power system[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(1): 44-47.
- [3] 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学报,2008,20(2):1-8.  
ZHANG Xing, ZHANG Long-yun, YANG Shu-ying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2):1-8.
- [4] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICZ J T. Power-electronic systems for the grid integration renewable energy sources:

A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4):1002-1016.

- [5] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of Permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1):130-136.
- [6] 肖磊.直驱型永磁风力发电系统低电压穿越技术研究[D].长沙:湖南大学,2009.  
XIAO Lei. Research on the low voltage ride through capability of directly-driven PM wind generation system[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [7] 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, U K, 2004: 934-938.
- [8] SLOOTWEG J G, de HAAN S W H, POLINDER H. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations[J]. IEEE Trans Power System, 2003, 18(1):144-151.
- [9] 廖勇,庄凯,姚骏.直驱式永磁同步风力发电机双模功率控制策略的仿真研究[J].中国电机工程学报,2009,29(30):76-82.  
LIAO Yong, ZHANG Kai, YAO Jun. Dual-mode power control strategy simulation study of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30):76-82.
- [10] ESMAILI R, XU L, NICHOLS D K. A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application[J]. Power Engineering Society General Meeting, 2005(3):2090-2095.
- [11] CHEN Z, SPOONER E. Voltage source inverters for high-power, variable-voltage DC power sources[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5):439-447.
- [12] NIAN Heng, ZENG Rong, LIU Jiao. Complementary half controlled converter for directly-driven PM synchronous generator in wind power generation application[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, USA, 2009: 358-362.

(责任编辑 李新捷)

## LVRT of a MW-level wind turbine unit with a direct-driven permanent magnet synchronous generator

LIU Sheng-wen<sup>1</sup>, BAO Guang-qing<sup>1</sup>, FAN Shao-wei<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, LI Zheng-yuan<sup>2</sup>

(1. College of Telecommunications, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** By studying the low voltage ride through (LVRT) capability of a MW-level variable speed wind turbine unit with a direct-driven permanent magnet synchronous generator (PMSG), an improved DC link voltage control strategy was proposed. This strategy can suppress dynamic over-voltage at DC buses by adjusting DC current and controlling the generator output. Compared with the traditional control strategy, the improved one uses the double closed-loop control structure with the current inner loop and the DC link voltage outer loop in the boost chopper converter. And its inverter has also the double closed-loop structure with the current inner loop and the rotating speed outer loop. The simulation results show that the improved control strategy can effectively improve the LVRT capability of a variable speed wind turbine unit with a PMSG.

**Key words:** permanent magnet synchronous generator; voltage sag; low-voltage ride-through; DC link voltage control