

风储联合并网发电系统的控制策略研究^{*}

梁 洲 陈意军

(湖南工程学院 湘潭 411100)

摘 要: 并网运行控制方法是保证风储联合发电系统可靠运行需要解决的关键技术问题之一。本文首先建立了风力涡轮机和锂离子蓄电池的数学模型,并且给出了风力发电系统网侧和机侧变换器在两相同步旋转坐标系下的数学模型。详细研究了风力发电系统和储能逆变器的并网运行控制策略。最后通过仿真研究验证了本文研究方法的可行性和有效性。

关键词: 直驱永磁同步电机;电压定向矢量控制;储能逆变器;并网控制;系统建模

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Study on control strategy of Wind-ES grid-connected system

Liang Zhou Chen Yijun

(Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The control method of grid-connected operation is one of most important issues for ensuring the system reliable operation. First, the mathematical model of wind turbine and Li-ion battery is built, and the mathematical model of grid-side converter and machine-side converter are given under two phase synchronized rotation reference frame. The control methods of wind generation system and battery storage inverter are analyzed in detail. Finally, the effectiveness of proposed method is verified by simulation results.

Keywords: permanent magnet synchronous generator; voltage orient vector control; battery storage inverter; grid-connected control; system modeling

1 引 言

由于能源危机和环境污染等问题的日益严重,大力发展可再生能源是解决上述问题的主要手段。风力发电是近年发展最快的可再生能源、到 2010 年底,全球累计装机容量约 200 GW,风力发电已成为全球各国发展最快的可再生能源^[1]。随着风力发电的大规模开发利用,风电在一些国家已经起到了重要作用,风电在丹麦和西班牙的发电比例已经达到了 22%和 16%。为了实现能源结构调整,我国相应的颁发了《可再生能源法》鼓励风电发展,在 2005~2010 期间,中国风力发电的累计装机容量增加了 35 倍,在 2010 年年底,总的累计装机容量达到了 44.73 GW,超越了美国在世界排名第一^[2]。

传统风力发电系统通常采用定速恒频运行方式,然而由于定速恒频风力发电系统具有风能利用率低、体积大、无法实现对有功和无功功率的灵活控制等缺点逐渐被变速恒频风力发电系统所取代。目前应用最为广泛的变速恒频风力发电系统主要包括两种:直驱永磁同步风力发电系统和

双馈型风力发电系统^[3]。

直驱永磁同步风力发电系统属于全功率型变速恒频风力发电系统,相对于双馈型风力发电系统,主要优势包括:1)无需变速齿轮箱,减小了维修成本;2)定子侧与电网通过背靠背变换器相连,当电网发生短路故障期间,通过切换网侧变换器的控制策略使其运行在 STATCOM 模式,此时转子侧不需要封锁脉冲,网侧变换器可以向电网发出无功功率帮助 PCC 电压恢复,进而能够实现低电压穿越运行^[4]。

在变速恒频风力发电系统中,通常需要配置储能单元。储能单元有两种接入方式,一种是通过双向 DC/DC 变换器接入风力发电系统的直流侧;另一种是通过逆变器接入风力发电系统的交流侧,两种接法分别与直流微电网^[5]和交流微电网结构^[6]类似。储能单元主要作用是平抑风电输出功率波动、辅助实现故障穿越控制以及协调控制运行等。本文主要研究风、储联合并网运行控制策略。本文首先建立了风力涡轮机、网侧变换器、机侧变换器以及储能单元的数学模型。给出了风力发电系统和储能逆变器的并网运行

控制策略,为了验证本文研究控制策略的有效性,通过 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了风、储联合发电系统的仿真试验平台,最后进行了仿真研究。

2 风储发电系统的数学建模

2.1 风储并网发电系统结构

在本文所研究的风、储联合系统中,其中风力发电系统主要由直驱永磁同步电机(permanent magnet synchronous generator,PMSG)、风力涡轮机以及双 PWM 变换器组成。蓄电池储能系统(battery energy storage,BES)主要由锂离子蓄电池和电压源型逆变器(voltage source converter,VSC)组成,其系统框图如图 1 所示。

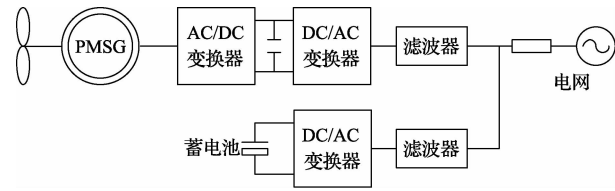


图 1 风储联合发电系统结构

2.2 直驱永磁同步风力发电系统的建模

2.2.1 风力涡轮机数学模型

风力从风能吸收的功率可以表示为^[7]:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{1}$$

式中: ρ 、 R 、 V 、 β 、 λ 分别表示空气密度、桨叶半径、风速、桨距角和叶尖速比, $C_p(\lambda, \beta)$ 表示风能利用系数。

风能利用系数是叶尖速比和桨距角的函数,反映了风力机从自然风能中吸收能量大小的程度,风能利用系数可以表示为:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_1}} + c_6 \lambda \tag{2}$$

式中: $\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$ 。

选取系统风力涡轮机参数如表 1 所示。

表 1 风力涡轮机的主要参数

名称	数值	名称	数值
额定风速	12 m/s	桨叶半径	4 m
最大风能利用系数	0.48	最佳叶尖速比	8.1
额定转速	24.3 rad/s	额定功率	25.53 kW
C_1	0.5176	C_2	116
C_3	0.4	C_4	5
C_5	21	C_6	0.0068

根据表 1 能够得到风力涡轮机特性曲线如图 2 所示。

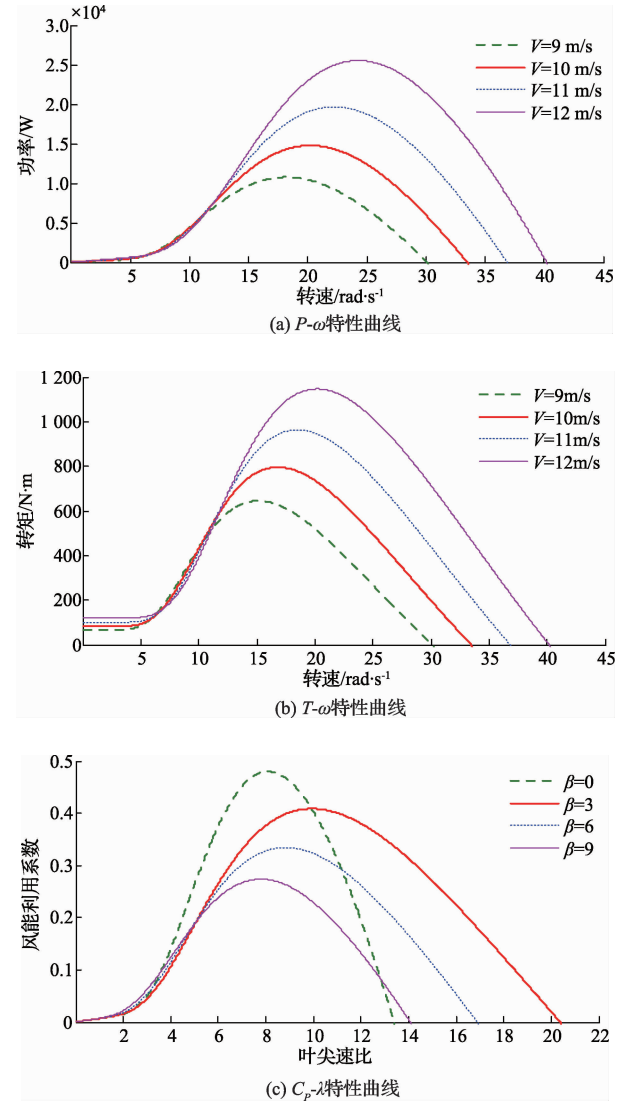


图 2 风力涡轮机特性曲线

根据图 2 可以看出,当风速逐渐增加时,系统的输出功率随着风速的增加而增加,风力涡轮机的转矩也相应地增加。从图 2(a)和(b)看出,在风速一定的情况下,存在唯一的最佳转速对应着最大功率点,因此可以根据最大功率跟踪算法通过对转速的闭环控制,实现最大功率跟踪运行。从图 2(c)可以看出,当桨距角逐渐增加时,风能利用次数减小,此时风机输出功率也相应的减小,当桨距角等于零时,此时风能利用系数最大,此时风力机能够吸收最大的功率,因此在额定风速以下,为了最大限度地捕获最大功率,通常将桨距角设置为零。

2.2.2 网侧变换器的数学模型

网侧变换器的系统结构框如图 3 所示。

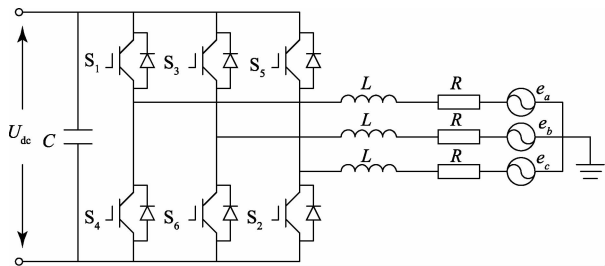


图 3 网侧变换器的结构框图

网侧变换器采用电压源型两电平变换器,网侧接有电感滤波器,直流侧接有直流电容,直流电容的接入能够使得风力发电系统的网侧变换器和机侧变换器实现解耦,进而保证网侧变换器和机侧变换器的独立运行。

当以电网电压 \$d\$ 轴为矢量定向时,网侧变换器在 \$dq\$ 同步旋转坐标系下的数学模型可以表示为:

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d s_d + i_q s_q) - \frac{u_{dc}}{R_L} \\ L \frac{di_d}{dt} + R i_d - \omega L i_q = e_d - u_{dc} s_d \\ L \frac{di_q}{dt} + R i_q + \omega L i_d = e_q - u_{dc} s_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$e_{dq}\$、\$s_{dq}\$ 和 \$i_{dq}\$ 分别表示电网电压、开关函数和网侧电流的 \$dq\$ 分量, \$\omega\$ 表示基波角频率, \$L\$ 表示滤波电感, \$R\$ 表示滤波电感等效串联电阻, \$C\$ 表示直流电容, \$u_{dc}\$ 表示直流电压。

网侧变换器的有功和无功功率可以表示为:

$$P = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (4)$$

$$Q = \frac{3}{2} (e_q i_d - e_d i_q) \quad (5)$$

2.2.3 机侧变换器的数学模型

机侧变换器的系统结构如图 4 所示。

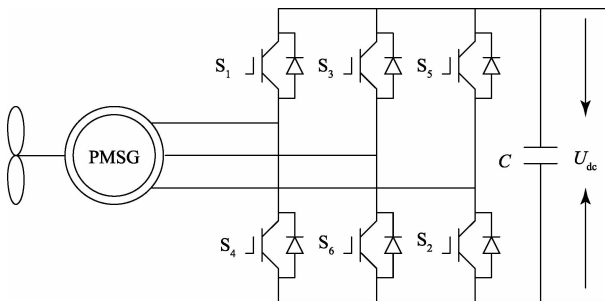


图 4 机侧变换器的结构框图

与网侧变换器类似,同样采用 \$d\$ 轴定向时,机侧变换器的 \$dq\$ 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} u_d = L' \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} + \omega_e L' i_{sq} + \omega_e \psi \\ u_q = L' \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} - \omega_e L' i_{sd} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \$u_{dq}\$ 和 \$i_{sdq}\$ 分别表示变换器侧电压和定子电流的 \$dq\$ 轴分量, \$R_s\$ 表示定子电阻, \$\omega_e\$ 表示电角速度, \$L'\$ 表示等效之后

的自感, \$\psi\$ 表示磁链幅值。

2.3 蓄电池储能系统的建模

本文采用的储能系统中,采用了锂离子蓄电池。锂离子蓄电池的充放电模型以及荷电状态可以表示为^[8]:

$$E_{disc} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (7)$$

$$E_c = E_0 - K \cdot \frac{Q}{0.1Q + it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (8)$$

$$SOC = 1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \quad (9)$$

式中: \$E_{disc}\$ 表示放电电流, \$E_c\$ 表示充电电流, \$E_0\$ 表示电压常数, \$K\$ 表示极化常数, \$Q\$ 表示蓄电池最大容量, \$it\$ 表示可提取的电能, \$i^*\$ 表示低频动态电流, \$A\$ 表示指数电压, \$B\$ 表示指数容量。

3 风储发电系统的控制策略

3.1 风力发电系统的控制策略

风力发电系统的控制系统主要包括:机侧和网侧变换器的控制。网侧变换器的主要控制目标是实现直流母线电压可控、网侧电流正弦化和单位功率因数运行控制。机侧变换器的主要控制目标是实现最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制和桨距角控制等。下面分别进行详细分析。

3.1.1 网侧变换器的控制策略

本文所研究的网侧变换器主要采用基于电网电压定向的矢量控制^[9],系统结构如图 5 所示。网侧变换器的控制系统包括电压外环和电流内环控制。电压外环主要控制直流母线电压,首先将直流电压参考值与电压反馈值相减,并经比例积分 (proportional-integral, PI) 调节器得到有功电流内环给定值 \$i_d^*\$,为了实现单位功率因数运行,设置无功电流给定值 \$i_q^*\$ 为 0,将电流内环指令与实际值相减经过 PI 控制能够得到 \$dq\$ 轴的电压分量,根据公式 (3) 可以看出 \$dq\$ 轴并不是完全解耦的, \$dq\$ 轴两者相互影响,因此为了消除 \$dq\$ 之间的耦合以及电网电压扰动对闭环控制的影响,采用了解耦和电网电压前馈控制,将 \$dq\$ 轴电流实际值乘以 \$\omega L\$

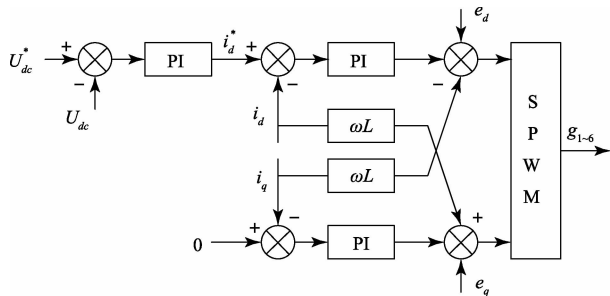


图 5 网侧变换器的控制策略

叠加到电流内环 PI 调节器输出。最终将补偿后的调制信号送入正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 模块进而能够得到网侧变换器的驱动信号控制网侧变换器的开关管工作。

3.1.2 机侧变换器的控制策略

机侧变换器的控制如图 6 所示,主要采用转速外环和电流内环控制策略。首先通过最大功率跟踪控制策略得到转速外环参考值 ω^* , 将其与实际转速 ω 相减经过 PI 调节器能够得到有功电流指令值 i_{sd}^* , 在电网电压正常情况下, 通常希望输出最大的有功功率, 且无功功率为 0, 因此设定无功电流指令值 i_{sq}^* 为 0。将电流指令值和实际值相减经过 PI 调节器得到调制信号, 根据公式 (4) 同样可以看出机侧变换器的 dq 轴之间也是存在耦合的, 因此为了消除耦合加入了解耦环节, 最终将调制信号通过 SPWM 模块生成 IGBT 驱动信号。

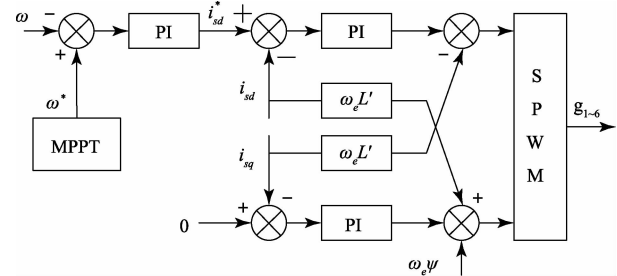


图 6 机侧变换器的控制策略

3.2 蓄电池储能系统的控制策略

蓄电池储能系统的控制方法如图 7 所示。蓄电池储能系统的主要作用实现控制有功功率和无功功率, 主要采用间接功率控制策略。在并网运行中, PCC 电压被电网电压钳位, 因此 PCC 电压基本是一个定值, 当采用 d 轴定向控制时, $u_q = 0$, 将其带入公式 (4) 和 (5) 得知:

$$P = \frac{3}{2} e_d i_d \tag{10}$$

$$Q = -\frac{3}{2} e_d i_q \tag{11}$$

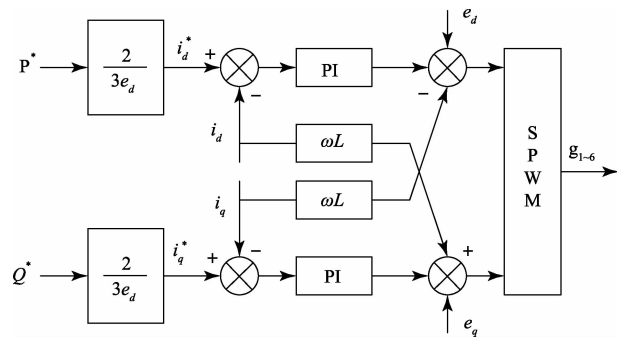


图 7 储能逆变器的控制策略

根据式 (10) 和 (11) 可以计算得到有功和无功电流参考为:

$$i_d^* = \frac{2P}{3e_d} \tag{12}$$

$$i_q^* = -\frac{2Q}{3e_d} \tag{13}$$

首先根据式 (12) 和 (13) 获得电流参考值, 然后将电流参考值与电流反馈值相减得到 dq 轴电压值, 为了消除 dq 轴之间的耦合, 同样也加入了解耦控制和前馈控制。

4 仿真研究

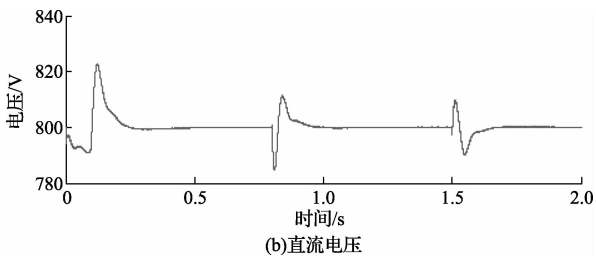
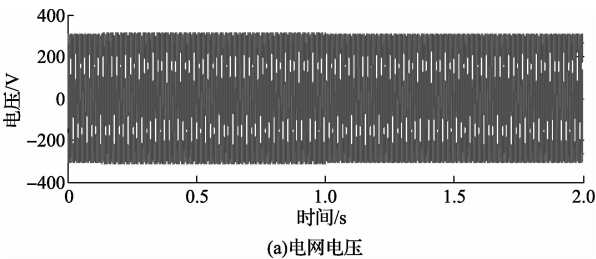
为了验证本文研究控制算法的有效性, 下面通过 MATLAB/Simulink 仿真软件进行仿真研究。系统框图如图 1 所示, 选取额定功率为 30 kW 的直驱永磁同步风力发电系统和额定功率为 20 kW 的储能逆变器, 其中系统参数分别如表 2 和表 3 所示, 两者并联连接, 接入同一条交流母线上, 交流母线上还接有 10 kW 的有功负荷。风力发电系统中机侧变换器采用图 6 给出的转速、电流双闭环控制, 网侧变换器采用图 5 基于电网电压定向的矢量控制, 储能逆变器采用图 7 间接功率控制。风储联合发电的系统仿真结果如图 8 所示。

表 2 直驱永磁同步风力机的主要参数

名称	数值	名称	数值
额定容量	30 kVA	电网电压	3800 V
额定频率	50 Hz	定子绕组	0.005 Ω
励磁电感	5 mH	额定磁通量	2 V · s
转动惯量	8 kg · m ²	极对数	6
网侧滤波电感	6 mH	直流电压	800 V
直流电容	5000 μF		

表 3 蓄电池的主要参数

名称	数值	名称	数值
额定电压	800 V	额定容量	50 Ah
放电电流	10 A	内阻	0.16 Ω
滤波电感	6 mH		



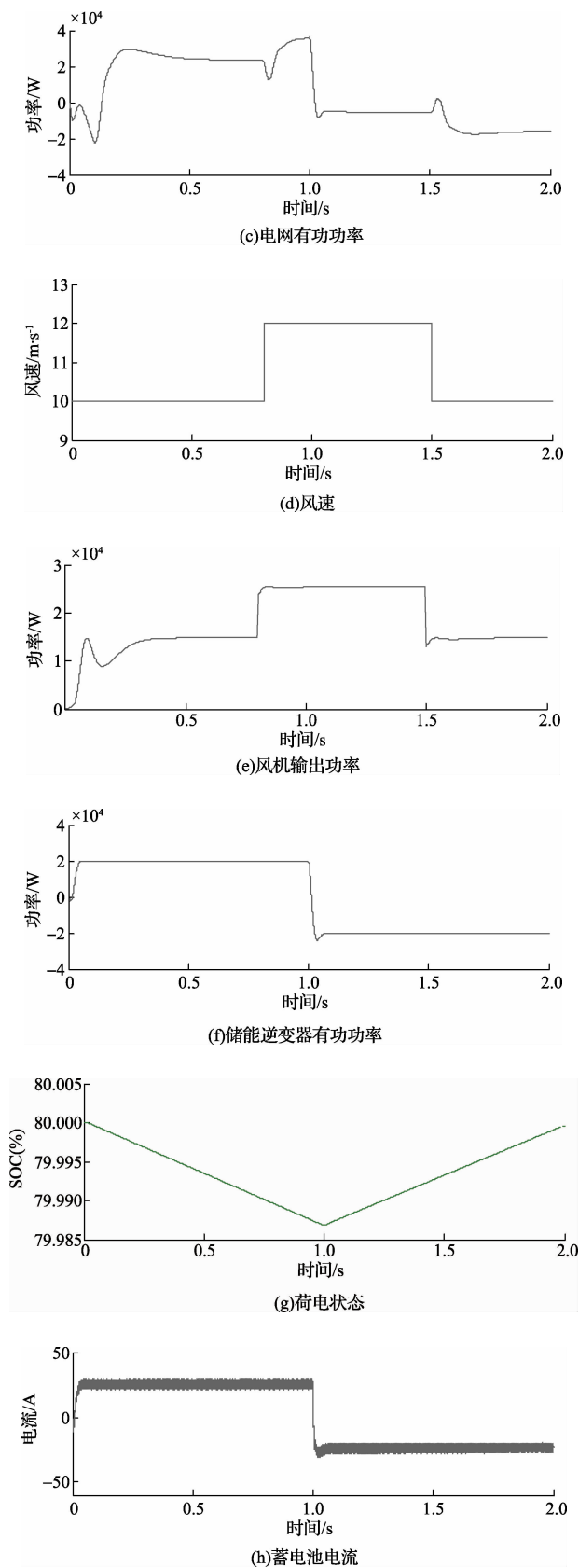


图 8 风储联合系统并网运行的仿真结果

图 8 给出了风、储联合发电系统并网运行的仿真结果。初始条件下,风速为 10 m/s,蓄电池 SOC 为 80%,储能系统有功功率参考值为 20 kW,从图中可以看出根据最大功率跟踪算法,风力发电系统运行在最大功率跟踪模式。初始条件下风机输出有功接近 14.7 kW,储能输出有功功率为 20 kW,负载吸收功率为 10 kW,去除线路损耗,此时电网吸收功率为 24 kW 左右,此时蓄电池 SOC 逐渐下降,蓄电池电流大于零,表明蓄电池工作在放电模式。

在 0.8 s 时,风速由 10 m/s 突变到 12 m/s,风速上升,机侧变换器根据最大功率跟踪算法调整转速参考值,使其跟踪上最大功率点,此时风机输出功率接近 25.5 kW,储能功率保持不变,此时电网吸收功率上升至 36 kW。

在 1 s 时,储能有功功率参考值突变到 -20 kW,此时储能系统吸收功率,蓄电池电流小于零,蓄电池 SOC 逐渐上升,蓄电池工作在充电模式,此时风机输出有功功率小于蓄电池吸收功率和负载功率之和,为了保持功率平衡,电网需要发出 5.5 kW 有功功率,保证系统稳定运行。

在 1.5 s 时,风速由 12 m/s 突变到 10 m/s,风速下降,导致风机输出功率降低,为了保证功率平衡,电网需要发出更多的功率补充风机发出功率的不足,此时电网输出有功功率为 16 kW。

5 结 论

本文针对直驱永磁同步风力发电机组和储能逆变器研究了并网运行时的控制策略。建立了风电机组和储能逆变器的数学模型,给出了风力发电系统网侧变换器、机侧变换器和储能逆变器并网运行控制策略。通过 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了风、储联合并网运行的仿真平台,并进行了仿真测试,仿真结果表明本文研究的控制策略的有效性和可行性。

参考文献

- [1] IOV F, BLAABJERG F. Power electronics and control for wind power systems[C]//Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009. IEEE, 2009; 1-16.
- [2] JIANG L P, CHI Y N, QIN H Y, et al. Wind energy in China[J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2011, 9(6): 36-46.
- [3] 程启明,程尹曼,王映斐,等. 风力发电系统技术的发展综述[J]. 自动化仪表, 2012, 33(1): 1-8.
- [4] 金玉洁,毛承雄,王丹,等. 直驱式风力发电系统的应用分析[J]. 能源工程, 2006, 3: 29-33.
- [5] 张学,裴玮,邓卫,等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5553-5562.

(下转第 13 页)