## 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究

李国庆1.王 鹤1,2.李鸿鹏1

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要:提出一种微电网中双馈感应风力发电系统的控制方法。并网运行时双馈感应发电机(DFIG)捕获最大风能,并采用灵敏度分析方法调整输出的无功功率来抵消有功功率变化引起的电压波动;孤岛时 DFIG 以电压幅值和频率可控的方式运行,并模仿下垂特性直接与其他采取下垂控制的分布式电源配合。仿真结果表明,所提方法能够调节微电网的有功功率平衡,并维持系统的电压稳定,在并网及孤岛运行状态下都能够保持微电网的平稳运行。

关键词:微电网:分布式发电:双馈感应电机:电压控制:灵敏度分析:下垂特性

中图分类号·TM 614

文献标识码. A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.001

#### 0 引言

风能是一种分布广泛的清洁能源,随着风电设 备成本的降低和可靠性的提高,风力发电可以作为 微电网中优先选择的分布式电源[13]。微电网是较薄 弱的小型发配电网络.风力发电的接入会对微电网 的稳定运行造成影响,风速的随机变化会导致风电 功率的明显波动和电能质量的下降[46]。采用双馈感 应发电机 DFIG(Doubly Fed Induction Generator)的 变速恒频发电机组是当前风力发电的主流机型,所 以对微电网中 DFIG 发电系统控制方法的研究具有 重要的意义[78]。文献[9]利用 DFIG 对微电网的频率 和电压进行管理,提高了微电网从并网向孤岛运行 方式过渡过程中的动态性能。文献[10]提出了一种 将由 DFIG 组成的风电场并入微电网的控制方法, 特别适合以风力发电作为主要电源的微电网使用。 文献[11]提出了一种基于 DFIG 的无功功率管理方 法,能够有效地维持系统的电压稳定。

微电网的并网和孤岛 2 种运行方式存在很大区别,本文针对微电网的并网及孤岛运行状态,分别提出了相应的 DFIG 风力发电系统控制方法。微电网并网运行时 DFIG 捕获最大风能,并且计及微电网线路中电阻参数所占比重较大导致风功率变化引起的电压波动,采用灵敏度分析的方法根据有功功率变化调整输出的无功功率来稳定微电网的电压。微电网孤岛运行时,DFIG 采用变桨距角控制并结合储能装置限制风电功率,使 DFIG 以频率和电压可控的方式工作,通过模拟下垂特性与其他逆变器电源一起协调控制微电网的频率和电压。仿真实验结果表明本文提出的微电网中 DFIG 风力发电系统控制方法

收稿日期:2012-10-23;修回日期:2013-08-30 基金项目:长江学者和创新团队发展计划(IRT1114)

Project supported by the Yangtze River Scholars and Innovation Team Development Plan(IRT1114)

## 1 微电网结构与组成

能够有效地解决风力发电向微电网中的集成。

本文选择 DFIG 风力发电、微型燃气轮机、燃料电池和光伏发电作为分布式电源,使用蓄电池作为储能装置,并结合负荷、电力电子接口设备和相应的控制装置构成微电网的主体结构,如图 1 所示。在整体控制策略上,本文采用微电网的分层控制结构[12]。微电网中心控制器 MGCC (MicroGrid Central Controller)和负荷控制器 LC(Load Controller)、微电源控制器 MC(Microsource Controller)之间需要建立可靠的通信连接。MGCC 安装在中压-低压变电站对微电网进行统一的协调控制;LC 和 MC 从属于 MGCC,分别对具体的负荷和微电源进行控制。

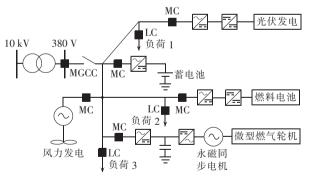


图 1 微电网结构

Fig.1 Structure of microgrid

微型燃气轮机能够提供 25~500 kW 的稳定功率输出,具有高燃料利用效率、低废气排放水平、低初始安装费用等优点。本文选择高速单轴结构的微型燃气轮机 SSMT(Single-Shaft MicroTurbine),使用文献[13]中给出的动态数学模型。单轴微型燃气轮机可以直接驱动永磁同步电机发电,发出的高频交流电经过整流和逆变之后向电网或者负荷供电。固体氧化物燃料电池 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell)是一种

在中高温下直接将燃料中的化学能转化成电能的新型发电装置,属于第 3 代燃料电池技术,具有燃料适应性广、能量转换效率高、零污染、低噪声等优点。本文采用文献[14]中的数学模型,并在 SOFC 电池组输出端接入 Buck-Boost 直流变换电路,最终通过逆变器将 Buck-Boost 电路输出的直流电压逆变成交流电压向电网或者负荷供电。光伏发电是另一种具有广泛应用前景的分布式电源,具有可再生、无污染、方便灵活、可与建筑集成等优点。本文采用文献[15]中的光伏发电模型,使用扰动观察法来进行最大功率点跟踪,在给定的温度和光照条件下,保证光伏发电系统一直运行在最大功率点附近。此外,本文选择蓄电池作为储能装置,并采用文献[16]中的三阶动态数学模型,其较精确地反映了蓄电池的充放电特性。

### 2 微电网中 DFIG 风力发电系统控制方法

#### 2.1 DFIG 数学模型

本文采用计及定子励磁电流变化的 DFIG 数学模型来研究其在微电网不同运行状态下的控制方法。在同步旋转坐标系下,DFIG 的电压和磁链方程如下[17]:

$$U_{s} = R_{s} I_{s} + \frac{\mathrm{d} \Psi_{s}}{\mathrm{d} t} + \mathrm{j} \omega_{e} \Psi_{s}$$

$$U_{r} = R_{r} I_{r} + \frac{\mathrm{d} \Psi_{r}}{\mathrm{d} t} + \mathrm{j} (\omega_{e} - \omega_{er}) \Psi_{r}$$

$$\Psi_{s} = L_{s} I_{s} + L_{m} I_{r}$$

$$\Psi_{r} = L_{m} I_{s} + L_{r} I_{r}$$
(1)

其中, $U_s$ 、 $U_r$ 、 $I_s$ 、 $I_r$ 、 $\Psi_s$ 、 $\Psi_r$  分别是定子和转子电压、电流和磁链矢量; $R_s$ 、 $R_r$ 、 $L_s$ 、 $L_r$  分别是定子和转子电阻和绕组自感; $L_m$  是定子和转子之间的互感; $\omega_e$  是同步电角速度; $\omega_{er}$  是转子电角速度。

计及定子励磁电流变化,令  $I_{mo}=L_sI_s/L_m+I_r$ ,则有下述 DFIG 数学模型:

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{U}_{s} = \boldsymbol{R}_{s} \boldsymbol{I}_{s} + \frac{L_{m} d \boldsymbol{I}_{mo}}{d t} + j \boldsymbol{\omega}_{e} \boldsymbol{\Psi}_{s} \\ &\boldsymbol{U}_{r} = \boldsymbol{R}_{r} \boldsymbol{I}_{r} + \frac{\boldsymbol{\sigma} L_{r} d \boldsymbol{I}_{r}}{d t} + \frac{L_{m}^{2}}{L_{s}} \frac{d \boldsymbol{I}_{mo}}{d t} + j \boldsymbol{\omega}_{1} \boldsymbol{\Psi}_{r} \end{aligned} \tag{2}$$

其中,定子和转子间漏磁系数  $\sigma=1-L_{\rm m}^2/(L_{\rm r}L_{\rm s})$ ,转 差电角速度  $\omega_1=\omega_2-\omega_{\rm mo}$ 

#### 2.2 微电网并网运行时 DFIG 控制方法

为了减小风速波动对微电网的影响,本文在 DFIG 出口处并联了由超级电容和蓄电池组成的混合储能 装置。微电网并网运行时,DFIG 风力发电系统的控 制原理如图 2 所示,控制方法由转子变流器控制、最 大功率点跟踪、网侧变流器控制、储能系统控制和功 率协调控制组成。

DFIG 转子变流器控制采用定子磁链定向的矢量控制方法,并且计及定子励磁电流的变化,在较精

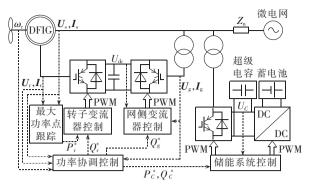


图 2 微电网并网运行时 DFIG 控制

Fig.2 DFIG control of grid-connected microgrid

确的模型下实现了有功功率和无功功率的解耦控制。对转子变流器,考虑 $U_s$ 和 $\Psi_s$ 的动态过程,由式(2)可得:

$$\boldsymbol{U}_{r} = R_{r} \boldsymbol{I}_{r} + \frac{\sigma L_{r} d \boldsymbol{I}_{r}}{d t} + j \omega_{1} \boldsymbol{\Psi}_{r} + \frac{L_{m}}{L_{r}} (\boldsymbol{U}_{s} - R_{s} \boldsymbol{I}_{s} - j \omega_{e} \boldsymbol{\Psi}_{s})$$
(3)

选择定子磁链定向,下标 d、q 分别表示各变量的 d 轴和 q 轴分量。在 dq 坐标下,有  $\Psi_{sd} = |\Psi_s|$ ,  $\Psi_{sq} = 0$ , 式(3)可以写成:

$$\begin{split} &U_{nd} = R_{r}I_{nd} + \frac{\sigma L_{r}dI_{nd}}{dt} - \omega_{1}\psi_{nq} + \frac{L_{m}}{L_{s}}(U_{sd} - R_{s}I_{sd}) \\ &U_{nq} = R_{r}I_{nq} + \frac{\sigma L_{r}dI_{nq}}{dt} + \omega_{1}\psi_{nd} + \frac{L_{m}}{L_{s}}(U_{sq} - R_{s}I_{sq} - \omega_{e}\psi_{sd}) \end{split} \tag{4}$$

可以根据式(4)对 DFIG 的有功功率和无功功率进行解耦控制,定子有功功率和无功功率控制闭环产生转子q 轴和d 轴参考电流 $I_{rq}$  和 $I_{rd}$ ,具体的控制原理可参考文献[18]。转子变流器有功功率参考值 $P_r^*$  由最大功率点跟踪方法给出,无功功率参考值 $Q_r^*$ 由功率协调控制给出。

为了提高微电网并网运行时的风能利用效率,需要进行最大功率点跟踪。假设风速为v,则风轮机能够捕获的最大功率可以表示为:

$$P_{\rm w} = 0.5 C_{\rm p}(\lambda,\beta) \rho S v^3 \tag{5}$$

其中, $\rho$  是空气密度;S 是风轮扫风面积,在最大功率点跟踪算法中都可以看成常数; $C_p(\lambda,\beta)$  是风能利用系数,其是叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的函数,文中将其简写为  $C_p$ ,  $P_w$  只与  $C_p$  有关。本文利用 DFIG 输出总功率的单峰特性,采用搜索的方法实现最大功率点跟踪[19]。

网侧变流器控制采用电网电压定向的矢量控制 方法,如果网侧变流器通过一个变压器与交流电网 相连,则:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} I_{gl} \\ I_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_{e} \\ \omega_{e} & \frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{gl} \\ I_{gq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_{gl} - e_{d} \\ -e_{q} \end{bmatrix}$$
 (6)

其中, $U_{gd}$ 是电网电压  $U_g$  的 d 轴分量; $I_{gd}$ 、 $I_{gg}$  分别是电网电流  $I_g$  的 d 轴、q 轴分量;R 和 L 分别是变压器的

等效电阻和电感; $e_{d}$ 、 $e_{q}$ 分别是变流器输入控制电压的 d 轴和 q 轴分量。由于采用电网电压定向  $U_{gl}$ =0, $I_{gl}$ 和  $I_{gl}$ 分别代表了变流器的有功电流分量和无功电流分量,可以实现功率的解耦控制。其 d 轴参考电流  $I_{gl}^*$ 由直流电压  $U_{de}$  控制闭环产生,为转子变流器提供稳定的直流电压,q 轴参考电流  $I_{gl}^*$  由无功功率  $Q_{gl}$  控制闭环产生,其参考值  $Q_{e}^*$  由功率协调控制给出。

混合储能装置中逆变器和双向 DC-DC 变换器的控制方法参考文献 [20], 逆变器采用电网电压定向的矢量控制方法实现有功功率和无功功率的解耦控制。储能装置的有功功率和无功功率参考值  $P_c^*$ 、 $Q_c^*$ 均由功率协调控制给出。微电网并网正常运行时,由大电网帮助维持功率平衡,储能装置有功功率设定值  $P_c^*=0$ 。

微电网线路的电阻参数较大,风力发电有功功率的随机变化将会导致电压的明显波动。本文中的功率协调控制采用灵敏度分析的方法,根据捕获的最大功率  $P_r^*$ 调节 DFIG 风力发电系统所发出的无功功率 Q 来稳定电压,并将无功功率在定子侧(转子变流器控制)、网侧变流器和储能装置之间分配。

首先确定 Q 值,考虑并网接口节点处的潮流方程, 在运行点处将潮流方程线性化:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P / \partial \theta & \partial P / \partial U \\ \partial Q / \partial \theta & \partial Q / \partial U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix}$$
 (7)

其中,P是 DFIG 风力发电系统所发出的有功功率,U、 $\theta$  分别是并网接口处电压的幅值和相角。假设潮流方程的雅可比矩阵是非奇异的,则灵敏度矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta P} & S_{\theta Q} \\ S_{UP} & S_{UQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$
 (8)

其中, $S_{\theta \nu}$ 、 $S_{\theta \nu}$ 、均是灵敏度矩阵中的元素,下标中的2个字母代表灵敏度关联的2个量。由上式可得由DFIG有功功率和无功功率变化引起的并网接口处的电压偏移:

$$\Delta U = S_{UP} \Delta P + S_{UO} \Delta Q \tag{9}$$

为了调节微电网侧并网接口处电压与大电网侧电压近似一致,DFIG 风力发电系统应该发出的无功功率为:

$$Q = \frac{\Delta U_0}{S_{UQ}} - \frac{S_{UP}}{S_{UQ}} (P - P_0) + Q_0 \tag{10}$$

其中, $P_0$ 、 $Q_0$  分别是运行点处的有功功率和无功功率, $\Delta U_0$  是运行点处电压与微电网并网电压之间的差值。

由网侧变流器优先承担系统要发出或吸收的无功功率。当网侧变流器能力不足时,由定子侧补充,这一优先顺序考虑了定子侧发出无功功率时定子电流增加所造成的损耗。当 DFIG 本身发出或吸收的

无功功率不能满足电压管理要求时,由储能装置提供支持。

#### 2.3 微电网孤岛运行时 DFIG 控制方法

当微电网孤岛运行时,与大电网的连接断开。为了维持微电网的稳定运行,需要对 DFIG 的输出功率进行限制。此时,DFIG 风力发电系统的控制原理如图 3 所示,控制方法由转子变流器控制、桨距角控制、网侧变流器控制、储能系统控制和功率协调控制组成。其中网侧变流器控制和储能系统控制采用的方法与微电网并网运行时相同,不再介绍。转子变流器仍然采用定子磁链定向的矢量控制方法,但是定子磁链  $\Psi$ 。不再由定子侧电压 U。决定,而是受励磁电流幅值 I 加控制。 $\Psi$  的相位角  $\theta$  不再通过观测 U 得到,而是通过对定子电压频率参考值 f 的积分得到。DFIG 不再捕捉最大风功率,而是表现为一个电压和频率可控的交流电源 [21]。

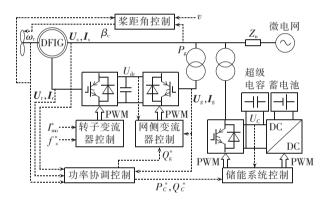


图 3 微电网孤岛运行时 DFIG 控制 Fig.3 DFIG control of islanded microgrid

由式(1),令 
$$\Psi_{sd} = |\Psi_{s}|, \Psi_{sq} = 0, 有:$$

$$I_{mo}L_{m} = \psi_{sd} \tag{11}$$

从上式可以看出,在 dq 坐标系下,定子磁链可以通过励磁电流  $I_{mo}$  控制,并且为了实现定子磁链定向, $I_{mq}$  需要根据  $I_{sq}$  进行调整,故选择参考值如下:

 $I_{\rm rq} = -(L_{\rm s}/L_{\rm m})I_{\rm sq}$ 

$$I_{\text{mo}}^* = U_{\text{s}}^* / (2 \pi f_{\text{s}} L_{\text{m}}) I_{\text{m}}^* = -(L_{\text{s}} / L_{\text{m}}) I_{\text{sq}}$$
 (12)

其中  $f_s$  是 DFIG 定子侧电压频率  $f_s$  是定子侧电压幅值的参考值。

由式(2),考虑  $\Psi_{sq}=0$ ,可以将定子侧电压方程简化为:

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{L_m dI_{mo}}{dt}$$

$$U_{sg} = R_s I_{sg} + \omega_1 \psi_{sd}$$
(13)

令定子时间常数 $\tau_{\rm ns}$ = $L_{\rm s}/R_{\rm s}$ ,定子漏磁系数 $\sigma_{\rm s}$ = $(L_{\rm s}-L_{\rm m})/L_{\rm m}$ ,有:

$$\tau_{\text{ns}} \frac{\mathrm{d}I_{\text{mo}}}{\mathrm{d}t} + I_{\text{mo}} = I_{\text{sd}} + \frac{1 + \sigma_{\text{s}}}{R_{\text{s}}} U_{\text{sd}}$$
 (14)

由上式,考虑到微电网稳定运行时  $U_s$  变化较小, $I_m$ 可以通过定子d 轴电流  $I_{sd}$  控制。

由式(11)—(14),通过上述定子磁链定向的矢量控制方法,DFIG 可以看作是一个频率和电压可控的交流电源。该方法最大的缺点是不能够直接控制 DFIG 的转矩,因为  $I_{sq}$  由负载决定, $I_{rq}$  必须跟踪  $I_{sq}$  的变化而不能用来控制转矩。

本文采用桨距角控制来间接控制 DFIG 的转矩,式(5)中风能利用系数由下式确定:

$$C_{\rm p} = 0.5 \,\mathrm{e}^{-0.17\lambda} (\lambda - 0.002 \,2\beta^2 - 5.6)$$
  
 $\lambda = 2.237 \,Nv/\omega_{\rm r}$  (15)

其中,N是齿轮比, $\omega_r$ 是轴角速度。则桨距角控制的参考值为。

$$C_{p}^{*} = P_{n} / (0.5\rho S v^{3})$$

$$\lambda^{*} = 2.237 N v / \omega_{r}^{*}$$

$$\beta^{*} = \sqrt{45.45 (\lambda^{*} - 5.6 - 2 C_{p}^{*} / 3^{-0.37\lambda^{*}})}$$
(16)

其中, $P_n$ 是设定的负荷有功功率需求, $C_p^*$ 、 $\lambda^*$ 、 $\beta^*$ 、 $\omega_r^*$ 分别是各变量的参考值。将上式线性化,用下标 0 表示线性化的点,符号  $\delta$  表示变量在线性化点附近的微小增量,得到:

$$\delta_{C_{p}} = \left[ 0.5 e^{-0.17\lambda_{0}} (1.952 - 0.17\lambda_{0} + 0.0037\beta_{0}^{2}) \right] \delta_{\lambda} + (-0.022\beta_{0} e^{-0.17\lambda_{0}}) \delta_{\beta} = M_{1}\delta_{\lambda} + M_{2}\delta_{\beta}$$

$$\delta_{\lambda} = (2.237 N/\omega_{t0}) \delta_{v} - (2.237 Nv_{0}/\omega_{t0}^{2}) \delta_{\omega_{v}} = M_{3}\delta_{v} + M_{4}\delta_{\omega_{v}}$$

$$\delta_{P_{a}} = (1.5\rho SC_{p0}v_{0}^{2}) \delta_{v} + (0.5\rho Sv_{0}^{3}) \delta_{C_{p}} = M_{5}\delta_{v} + M_{6}\delta_{C_{p}}$$
(17)

DFIG 的转矩和转速由下式决定:

$$T_{e} = P_{n} / \omega_{r}$$

$$\dot{\omega}_{r} = \frac{1}{I} (T_{m} - P_{n} / \omega_{r})$$
(18)

其中, $T_m$ 和 $T_e$ 分别是DFIG的机械转矩和电磁转矩,I是转动惯量。同样将上式线性化,有:

$$\delta_{T_{e}} = (1/\omega_{r0})\delta_{P_{n}} + (-P_{r0}/\omega_{r0}^{2})\delta_{\omega_{r}} = M_{7}\delta_{P_{n}} + M_{8}\delta_{\omega_{r}} = \delta_{T_{m}}$$

$$\delta_{\dot{\omega}_{r}} = \frac{1}{I}\delta_{T_{m}} - \frac{1}{I} \left(\frac{1}{\omega_{r0}}\delta_{P_{n}} - \frac{P_{n}}{\omega_{r0}^{2}}\delta_{\omega_{r}}\right)$$
(19)

进一步整理.得.

$$\delta_{T_{v}} = N_1 \delta_v + N_2 \delta_{u_0} + N_3 \delta_{\beta} \tag{20}$$

$$\delta_{\omega_{r}} = \frac{N_{1}}{J} \delta_{v} + \left(\frac{N_{2}}{J} + \frac{P_{n}}{J\omega_{r0}^{2}}\right) \delta_{\omega_{r}} + \frac{N_{3}}{J} \delta_{\beta} - \frac{1}{J\omega_{r0}} \delta_{P_{n}} \quad (21)$$

 $N_1 = M_5 M_7 + M_1 M_3 M_6 M_7$ 

$$N_2 = M_8 + M_2 M_3 M_6 M_7 \tag{22}$$

 $N_3 = M_4 M_6 M_7$ 

其中, $M_1 - M_8$ 、 $N_1 - N_3$  是计算的中间变量。设 $\tau_\beta$  是桨距角变化的时间常数,则桨距角的动态变化满足如下关系.

$$\delta_{\dot{\beta}} = (1/\tau_{\beta})(\delta_{\beta_c} - \delta_{\beta}) \tag{23}$$

由桨距角和转速构成状态变量,由式(21)和式(23)可以得出状态方程为:

$$\delta_{\dot{x}} = A\delta_{x} + B\delta_{u} + E\delta_{d}$$
  
$$\delta_{y} = C\delta_{x} + D\delta_{u}$$
(24)

式(24)中状态变量、输入变量和扰动分别为:

$$\boldsymbol{\delta}_{x} = \begin{bmatrix} \delta_{\beta} \\ \delta_{\omega_{t}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta}_{u} = \begin{bmatrix} \delta_{\beta_{t}} \\ \delta_{\omega_{t}^{*}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta}_{d} = \begin{bmatrix} \delta_{P_{n}} \\ \delta_{v} \end{bmatrix}$$
 (25)

系数矩阵分别为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_{\beta}} & 0\\ \frac{N_3}{J} & \frac{N_2}{J} + \frac{P_n}{J\omega_{r0}^2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_{\beta}} & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0\\ \frac{-1}{J} & \frac{N_1}{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

桨距角控制的最大调节速度受机械调整部件的限制,本文中限制最大调节速度为 $\pm3^\circ/s$ ,所以桨距角控制需要具有良好的阻尼。经过反复实验验证,本文选择闭环极点为-0.15和-1.5,此时系统为过阻尼状态,阻尼比为1.7。该闭环极点设置能够同时满足限制最大调节速度和较快速响应的要求。根据闭环极点的设置方法,此时相应的反馈系数为 $k_{fi}=0.65,k_{fi}=-0.88$ 。综合上述分析,桨距角控制的输入信号由下式产生:

$$\beta_{c} = \beta^{*} + k_{f_{1}}(\beta^{*} - \beta) + k_{f_{2}}(\omega_{r}^{*} - \omega_{r})$$
 (27)

DFIG 的功率协调控制负责配合桨距角控制维持 DFIG 的功率平衡。当可用风功率  $P_w < P_n$  时,不进行桨距角调整,使  $\beta = 0$ ,功率协调控制设定储能系统来补充风功率的不足。当  $P_w > P_n$  时,由风功率提供全部  $P_n$ ,并且优先通过桨距角控制调整 DFIG 输出的有功功率。由于桨距角控制响应较慢,当调节能力不足时,由储能装置配合调节。本文通过设定桨距角控制中转子角速度  $\omega_r$  的上、下限  $\omega_{th}$  和  $\omega_{tl}$  与储能装置协调,即令:

$$\omega_{\rm rl} \leqslant \omega_{\rm r} \leqslant \omega_{\rm rh}$$
 (28)

当风速增加,桨距角控制不满足要求,转子角速度  $\omega_r > \omega_n$ 时,功率协调控制通过设定储能系统的  $P_c^*$ 来吸收额外的功率;当风速降低,转子速度  $\omega_r < \omega_n$ 时,功率协调控制设定  $P_c^*$ 来补充不足的功率需求。在孤岛运行时,本文选择储能系统优先发出或吸收无功功率。

微电网孤岛运行时,DFIG 的有功功率和无功功率需求  $P_n$  和  $Q_n$  由下垂特性给出。本文中 DFIG 采取可变的下垂系数,当风速变化较大时,可以通过改变下垂系数来修改  $P_n$ ,既降低了储能装置的充放电次数,又避免了风电功率与需求功率差额较大时储能装置

的能力不足。

可变下垂系数由预先设定好的几组不连续下垂系数组成。每组中所有分布式电源的下垂系数之和相等,这样能够保证微电网频率和电压的单位调节功率是固定的,下垂系数调整的结果是使负荷在各个分布式电源中重新分配。在其他分布式电源容量允许的情况下,几组下垂系数按照 DFIG 承担的负荷比例从大到小顺序排列。设定 DFIG 可用风电功率 $P_{\rm w}$ 和需求功率 $P_{\rm n}$ 之间差额的阈值,当 $P_{\rm w}$ - $P_{\rm n}$ <0时,将下垂系数调整为后一组,减少 DFIG 承担的负荷比例,即减少 $P_{\rm n}$ 和 $Q_{\rm n}$ ;反之,当 $P_{\rm w}$ - $P_{\rm n}$ >0.2 p.u. 时,将下垂系数调整为前一组,增加 $P_{\rm n}$ 和 $Q_{\rm n}$ 。

因为风功率具有随机性,下垂系数的修改不能是连续实时的,否则会因下垂系数的频繁变化影响系统的稳定运行。可以设定每间隔一段时间检测一次,如果调整的阈值条件满足并保持2s,则对下垂系数进行调整。

#### 3 仿真分析

本文采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了微电网仿真实验平台。本文共有 2 个算例,采用图 1 中的微电网结构,DFIG、微型燃气轮机、燃料电池、光伏发电和蓄电池 5 条线路都是 380 V 线路,参数为  $R_1$ =0.641  $\Omega/\text{km},X_1$ =0.101  $\Omega/\text{km},5$  条线路长度分别为 200 m、400 m、200 m、200 m 和 20 m。大电网侧线路为 10 kV 线路,参数为  $R_2$ =0.347  $\Omega/\text{km},X_2$ =0.2345  $\Omega/\text{km}$ ,线路长度为 1000 m。此外,DFIG、微型燃气轮机、燃料电池和光伏发电的主要参数详见参考文献[13-17]。

算例 1:微电网并网运行,微型燃气轮机、燃料电池和光伏发电都采用 PQ 控制,DFIG 跟踪最大风功率,仿真实验结果见图 4。

图 4(a)中转速、直流侧电压及转矩为标幺值。从图中可看出,仿真实验采用的风速在 10~12.5 m/s 之间变化。通过最大风功率跟踪,DFIG 转速随风速变化。当风速变化较慢时,转速的实际值与控制的设定值基本保持一致;当风速发生突变时,转速的实际值会短时偏离设定值,并逐渐跟踪设定值的变化。在整个仿真实验过程中,DFIG 直流侧电压保持稳定,DFIG 的电磁转矩  $T_m$  保持平衡,与捕获的风功率变化相一致。

图 4(b)中纵轴均为标幺值,前 2 幅图分别给出了采用单位功率因数控制和采用灵敏度分析方法控制无功功率时 DFIG 的功率仿真实验结果。2 种情况下 DFIG 的有功功率 P 相同,都捕获了最大的风能。单位功率因数控制时 DFIG 不发出无功功率,Q=0,采用灵敏度分析方法控制时发出的无功功率 Q 随有

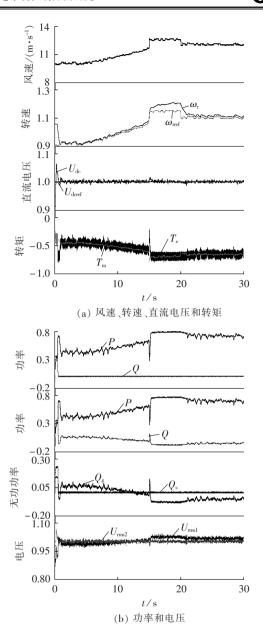


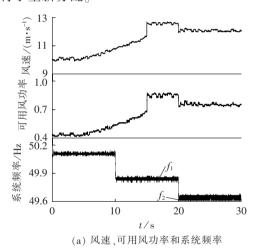
图 4 微电网并网运行 DFIG 仿真结果 Fig.4 Simulative results of DFIG control for grid-connected microgrid

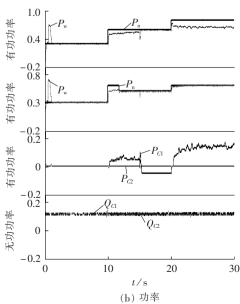
功功率 P 变化而不断调整。第 3 幅图中  $Q_g$  和  $Q_s$  分别表示采用灵敏度分析方法时网侧变流器和定子侧发出的无功功率,从图中可以看出 Q 优先由网侧变流器承担,当网侧变流器能力不足时才由定子侧负责承担。第 4 幅图给出了 2 种情况下并网接口处节点电压的比较,可以看出采用单位功率因数控制时电压 $U_{msl}$  受 DFIG 有功功率变化的影响有明显的波动,而采用灵敏度分析方法控制 DFIG 的无功功率后电压 $U_{msl}$  得到改善。

算例 2:微电网孤岛运行,光伏发电采用 PQ 控制,跟踪最大功率约 16 kW,微型燃气轮机、燃料电池和 DFIG 都模拟下垂特性,仿真开始时微型燃气轮机和燃料电池下垂系数选择为  $k_{Pl}=100 \text{ kW}/\text{Hz}$ , $k_{Ql}=1.315$  79 kvar/V,运行点为 40 kW, 380 V, DFIG 下垂

系数选择为  $k_{P2}$ =200 kW/Hz、 $k_{Q2}$ =1.315 79 kvar/V,运行点为 80 kW、380 V。可变下垂系数采用较简单的情况,只在 10 s 时刻进行一次检测,并且只采用 2 组下垂系数。除初始下垂系数之外,另一组下垂系数设置为  $k_{P1}$ =150 kW/Hz、 $k_{Q1}$ =1.315 79 kvar/V, $k_{P2}$ =100 kW/Hz、 $k_{Q2}$ =1.315 79 kvar/V。负荷参数为  $P_1$ =45 kW, $Q_1$ =8 kvar, $P_2$ =55 kW, $Q_2$ =6 kvar, $P_3$ =40 kW, $P_2$ =85 kW, $P_3$ =90 kW,在  $P_3$ =95 kW。采用恒定下垂系数和可变下垂系数 2 种情况下的仿真实验结果如图 5 所示。

图 5(a)中可用风功率为标幺值,由图可见仿真实验使用的风速与算例 1 相同。从图中可以看出,可用的最大风功率随风速不断变化,而且 2 种情况下系统的频率变化基本相同。这是因为下垂系数的调整中保证微电网频率和电压的单位调节功率不变,虽然下垂系数发生了变化,但整体上相同的功率变化引起的频率变化相同,只是负荷在分布式电源之间进行了重新分配。





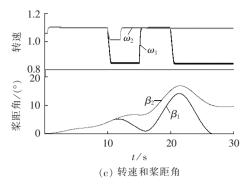


图 5 微电网孤岛运行 DFIG 仿真结果 Fig.5 Simulative results of DFIG control for islanded microgrid

图 5(b) 中纵轴均为标幺值, 前 2 幅图分别给出 了 2 种情况下 DFIG 的有功功率设定值  $P_a$  和实际值  $P_{wo}$  第 1 幅图采用恒定下垂系数时 DFIG 有功功率不 能满足下垂控制给出的设定值,第2幅图在可变下 垂系数情况下.DFIG 基本可以承担全部由下垂控制 给出的有功功率设定值。后 2 幅图分别是储能装置 在 2 种情况下的有功功率和无功功率对比,下标 1 表 示恒定下垂系数,下标2表示可变下垂系数。从图中 可以看出,无功功率下垂系数在调整时保持不变,所 以2种情况下 DFIG 的无功功率基本相同。下垂系 数控制模块在 10 s 时刻检测到  $P_w - P_n < 0$ ,并保持 2 s, 满足调整条件,将下垂系数调整为后一组。此时, k<sub>P2</sub> 由 200 kW/Hz 变为 100 kW/Hz,P<sub>n</sub> 由 0.6 p.u.变 成 0.4 p.u.。原本 DFIG 风功率无法满足负荷功率需 求,调整后能够满足。从后2幅图中可以看出,恒定下 垂系数时需要储能装置不断配合平衡风功率的变 化,而采用可变下垂系数时通过改变P,使负荷的需 求主要由风功率提供,避免了储能装置的频繁动作 和能力不足。

图 5(c)是 2 种情况下 DFIG 转速和桨距角的变化情况,桨距角控制的最大调节速度为 ±3°/s,图中转速为标幺值。从图中可以看出,采用可变下垂系数时 DFIG 的转速和桨距角变化比恒定下垂系数时平缓得多,避免了短期的快速反复调节。

#### 4 结论

本文提出了一种微电网中 DFIG 风力发电系统的控制方法,该方法充分考虑了微电网 2 种运行方式的特点。并网运行时通过最大功率跟踪充分利用风能,并且利用灵敏度分析方法稳定风功率变化引起的电压波动;孤岛运行时模仿下垂特性与其他分布式电源一起协调控制微电网的频率和电压,通过同步设置可变的下垂系数调整 DFIG 的有功需求,并通过桨距角控制和储能装置的支持调节 DFIG 的有功功率输出。仿真实验结果表明本文提出的方法



能够有效克服风速变化对微电网稳定运行的影响, 实现风能的高效可靠利用。

#### 参考文献:

- [1] 王海超,鲁宗相,周双喜,等. 风电场发电容量可信度研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):103-106.
  - WANG Haichao, LU Zongxiang, ZHOU Shuangxi, et al. Research on the capacity credit of wind energy resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10):103-106.
- [2] BARTON J P,INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2):441-448.
- [3] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):1-5.
  - YANG Xiuyuan,XIAO Yang,CHEN Shuyong. Wind speed forecast model for wind farms based on time series analysis [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):1-5.
- [4] 别朝红,李更丰,王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综 述[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
  - BIE Zhaohong, LI Gengfeng, WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1):1-6.
- [5] 李振杰,袁越. 智能微网:未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):42-48.
  - LI Zhenjie, YUAN Yue. Smart microgrid; a novel organization form of smart distribution grid in the future [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17):42-48.
- [6] 郭力,王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):82-86.
  - GUO Li, WANG Chengshan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2):82-86.
- [7] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009.33(11).6-11.
  - DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11):6-11.
- [8] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007,31(19):100-107.
  - LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electrical Power Systems, 2007, 31(19):100-107.
- [9] SHAHABI M, HAGHIFAM M R, MOHAMADIAN M, et al. Microgrid dynamic performance improvement using a doubly fed Induction wind generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1):137-145.
- [10] FAZELI M, ASHER G M, KLUMPNER C, et al. Novel integration of DFIG-based wind generators within microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3):840-850.
- [11] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):389-396.
- [12] 王成山,肖朝霞,王守相. 徽网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7);98-103.
  - WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthesized control and analysis of microgrid [J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2008, 32(7):98-103.
- [13] GAONKAR D N,PILLAI G N,PATEL R N. Dynamic performance of microturbine generation system connected to grid [J]. Journal of Electric Power Components Systems, 2008, 36 (10): 1031-1047
- [14] 方如举,张元敏. 燃料电池并联供电系统的建模和控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):75-78.
  - FANG Ruju, ZHANG Yuanmin. Modeling and control of power supply system with parallel fuel cells[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1):75-78.
- [15] 郭力,王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):82-86.
  - GUO Li, WANG Chengshan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2):82-86.
- [16] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在 微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
  - ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (12):85-89.
- [17] 郑重,杨耕,耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):7-14.
  - ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):7-14.
- [18] 李晶,方勇,宋家骅,等. 变速恒频双馈风电机组分段分层控制 策略的研究[J]. 电网技术,2005,29(9):15-21.
  - LI Jing, FANG Yong, SONG Jiahua, et al. Research on subsection and layer control strategy of doubly-fed variable speed wind turbine [J]. Power System Technology, 2005, 29(9):15-21.
- [19] KOUTROULIS E, KALAITZAKIS K. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(2);486-494.
- [20] 于芃,周玮,孙辉,等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(17):127-133. YU Peng,ZHOU Wei,SUN Hui,et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(17):127-133.
- [21] 张俊峰,毛承雄,陆继明,等. 双馈感应发电机的直接功率控制 策略研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):31-35. ZHANG Junfeng,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. Direct power control strategy of doubly fed induction generator [J].

Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4):31-35.

#### 作者简介:

李国庆(1963-),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和配电系统自动化等领域的理论与应用:

王 鹤(1983-),男,辽宁昌图人,讲师,博士研究生,研究方向为风力发电、分布式发电、微电网的运行与控制(E-mail:wanghe\_nedu@163.com);

李鸿鹏(1988-),男,吉林吉林人,硕士研究生,研究方向 为微电网的运行与控制。

(下转第52页 continued on page 52)



- [17] 毛鹏,谢少军,许泽刚. IGBT 模块的开关暂态模型及损耗分析 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(15):40-47.
  - MAO Peng,XIE Shaojun,XU Zegang. Switching transients model and loss analysis of IGBT module[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(15):40-47.
- [18] BLAABJERG F, JAEGER U, MUNK N S. Power losses in PWM-VSI inverter using NPT or PT IGBT devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(3):358-367.
- [19] BLAABJERG F,PEDERSEN J K,JAEGER U. Evaluation of modern IGBT-modules for hard-switched AC/DC/AC converters [C] // Thirtieth IAS Annual Meeting on Industry Applications. Orlando, FL,USA;IEEE,1995;997-1005.
- [20] KOLAR J W,ZACH F C,CASANELLAS F. Losses in PWM inverters using IGBTs[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 1995, 14(4);285-288.
- [21] 胡建辉,李锦庚,邹继斌,等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及 散热系统设计[J]. 电工技术学报,2009,24(3):159-163. HU Jianhui,LI Jingeng,ZOU Jibin,et al. Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24 (3):159-163.
- [22] 吴锐,温家良,于坤山,等. 不同调制策略下两电平电压源换流器损耗分析[J]. 电网技术,2012,36(10):93-98.

  WU Rui,WEN Jialiang,YU Kunshan,et al. Analysis on power dissipation in two-level voltage source converters under different modulation strategies [J]. Power System Technology,2012,36 (10):93-98.
- [23] 王久和,李华德,王立明. 电压型 PWM 整流器直接功率控制系统[J]. 中国电机工程学报,2006,26(18):54-60. WANG Jiuhe,LI Huade,WANG Liming. Direct power control system of three phase Boost type PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(18):54-60.
- [24] 易映萍,刘刚,胡四全. 20 kW 三电平并网变流器主电路参数的设计[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):194-200.
  - YI Yingping, LIU Gang, HU Siquan. Design of main circuit parameters for 20 kW three-level grid-connected converter [J].

- Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 194-200.
- [25] KOLAR J W, ROUND S D. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems [J]. IEE Proceedings on Power Application, 2006,153(4):535-543.
- [26] MCGRATH B P, HOLMES D G. A general analytical method for calculating inverter DC-link current harmonics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5):1851-1859.
- [27] 曾翔君,张宏韬,李迎,等. 大功率直驱风电系统高效率变流器设计[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):15-21.

  ZENG Xiangjun,ZHANG Hongtao,LI Ying,et al. Design of

high-efficiency converters for large direct-drive wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(30):15-21.

- [28] 欧开健. STATCOM 直流侧电容值对系统谐波含量和电容电压 波动幅值的影响及其选择[J]. 电力自动化设备,2004,24(6): 6-9.
  - OU Kaijian. Effect of STATCOM DC capacitor on harmonic distortion and voltage fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6):6-9.
- [29] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流器技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
  - CHEN Yao. Research on full-scale grid-connected power conversion technology for direct-driven wind generation system [D]. Beijing; Beijing Jiaotong University, 2008.

#### 作者简介.

杨 捷(1988-),男,贵州安顺人,博士研究生,通讯作者,主要研究方向为新能源发电技术(**E-mail**:10121777@bjtu.edu.cn);

金新民(1950-),男,浙江临海人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子、交流传动、新能源发电、智能配电网:

吴学智(1975-),男,山西大同人,讲师,主要研究方向为 电力电子变换器及可再生能源发电系统。

# Power stack design of MW-level full-power grid-connected converter for wind power generation

YANG Jie<sup>1</sup>, JIN Xinmin<sup>1</sup>, WU Xuezhi<sup>1</sup>, LIANG Xiaoguang<sup>2</sup>, SONG Gaosheng<sup>2</sup>, YIN Jingyuan<sup>1</sup>

School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
 Mitsubishi Electric & Electronic (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** With the consideration of AC output ripple current, a method of power loss estimation with high accuracy is proposed. As the temperature rise of DC-link capacitor is closely associated with its ripple current, a simplified method is proposed to calculate the ripple current, which considers the influence of the parasitic parameters among power stacks on the ripple current of DC-link capacitor. A prototype of 1 MW power stack consisting of power device, radiator, DC-link capacitor and current sensor etc. is designed and totally tested. Test results show that, the proposed methods are effective, meeting the design requirements of MW-level full-power grid-connected converter for wind power generation.

**Key words**: wind power; electric converters; power stack; power loss estimation; DC link capacitor ripple current; testing; MW-level; design