

# 提升无功调节能力的双馈式风力发电机转速变模式控制策略

刘其辉,毛 未,高 瑜

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

**摘要:**分散式风电机组接入引起的配电网无功潮流变化易导致配电网出现电压偏差,由于配电网自身无功电压调节能力较弱,及时恢复母线电压到正常水平成为分散式风电机组的重要调节任务。提出一种以暂时牺牲最大风能追踪为代价的双馈式风电机组转速变模式控制策略。首先,以最大限度提高机组无功出力极限作为控制目标,寻求分散式风电机组向电网输送的无功功率最大值与风速、发电机转速间的关系,得到能使机组无功出力达到最大的发电机转速指令值;然后,根据控制目标及其他限制条件确定风电机组内部的无功分配方案;最后,结合传统控制算法制定双馈风力发电机转速变模式控制策略。PSCAD 的仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:**风电;双馈式风力发电机;转速控制;无功功率;最大化

**中图分类号:**TM 614

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.013

## 0 引言

按照风电场的装机容量,可将风电场划分为集中式(>5 MW)与分散式( $\leq 5$  MW)2 种类型。分散式风力发电机组以分散多点的方式接入配电网,具有“就地消纳、多点接入”<sup>[1]</sup>的特点。分散式风电不同于传统的集中式风电,接入分散式风电的节点向配电网注入功率,其注入的无功功率改变了配电网原有的潮流分布,严重时易导致电网电压质量恶化;分散式风电接入配电网后,在负荷变化的同时,风电出力的不确定性进一步增加了配电网电压质量的复杂性;随着风电出力的变化,配电网电压也呈现出波动性、随机性、快速性的变化特点。因此,分散式风电接入的配电网迫切需要无功电压调节。

由于分散式风电一般采用多点接入配电网,接入方式灵活,专门配置无功补偿设备一方面增加了投资,另一方面在无功补偿设备设计与运行方面很难适应分散式风电随机、灵活的接入特点<sup>[2]</sup>;大中型集中式风电场一般配置静止无功发生器(SVG)、静止无功补偿器(SVC)等无功补偿设备调节并网点电压,但在风电机组分布不集中的分散式风电开发模式下,不存在类似集中式风电场的唯一并网点,需要调节电压的节点不唯一或不固定,无功补偿设备很难适应分散式风电随机、灵活的接入特点,存在较大局限性;风电机组在大部分时间都运行在非满发工况下,具备一定的无功输出能力<sup>[3]</sup>,可将其充分利用。基于以上原因,本文考虑利用风电机组自身的无功调节能力进行配电网的无功电压调节。

在目前常用的风力发电机组中,双馈式异步发电机(DFIG)的机侧变流器(MSC)与网侧变流器(GSC)均可实现无功功率的双向控制,灵活性强,有利于风电机组参与电网的无功调节<sup>[4]</sup>。因此,本文

重点针对 DFIG 进行研究。

目前对于 DFIG 无功电压控制的研究,从内容上可以总结为无功极限特性<sup>[5-7]</sup>、无功机理分析<sup>[8-9]</sup>、发电机定子与网侧变流器侧无功分配方案<sup>[6,9-10]</sup>和无功控制策略<sup>[6,10-12]</sup>4 个方面。控制目标包括:降低运行损耗<sup>[13-14]</sup>、提高运行效率<sup>[13]</sup>、改善高/低电压穿越性能<sup>[14-15]</sup>以及提高机组无功出力极限<sup>[16]</sup>。

涉及单台机组无功控制策略的文献中,均以实现最大功率点追踪(MPPT)为目标,侧重于有功功率的优先控制,虽然实现了有功出力的最大化,却使得无功出力范围受到限制,抑制了机组的无功输出能力。在电网电压产生明显偏差或波动的情况下,充分挖掘风力发电机的无功输出能力,使其深度参与电网电压调节与控制已成为特定情况下风力发电机的首要任务,而 MPPT 的重要性可以短时退居其次。本文从最大限度提高机组无功出力极限的角度出发,寻求双馈风力发电机向电网输送的无功功率极限值与风速、风力机转速间的关系,得到能使无功出力极限达到最大值的风力发电机转速作为转速指令值;再根据控制目标及其他限制条件确定机、网侧无功分配方案,根据此方案制定无功控制策略,实现机组在电网电压正常时能够发出最大有功,在电网电压偏差严重时又能及时恢复电压正常的灵活优化控制;最后采用 PSCAD 仿真验证控制策略的有效性。

## 1 面向无功最大化的 DFIG 转速指令

### 1.1 DFIG 无功出力极限

如图 1 所示,DFIG 通过发电机定子与 GSC 共同向电网输送无功功率。

设  $s$  为 DFIG 的转差率,在忽略有功功率损耗的情况下,DFIG 定、转子有功功率的关系<sup>[5]</sup>为:

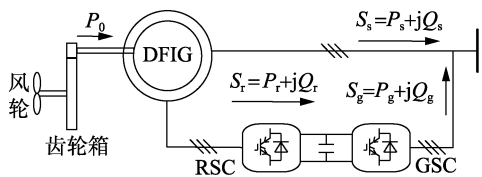


图 1 双馈式变速恒频风电系统模型

Fig.1 Model of doubly-fed variable speed constant frequency wind power system

$$P_r = P_g = sP_s \quad (1)$$

DFIG 定、转子无功功率的关系<sup>[5]</sup>为：

$$Q_s = Q_r/s - Q_\Sigma \quad (2)$$

$$Q_\Sigma = 3(X_s I_s^2 + X_r I_r^2 + X_m I_m^2) \approx \frac{U_s^2}{X_{ss}} \quad (3)$$

其中,  $I_s$ 、 $I_r$  分别为定、转子电流;  $X_r$  为转子漏抗;  $X_{ss} = X_s + X_m$ ,  $X_s$ 、 $X_m$  分别为定子漏抗与励磁电抗;  $U_s$  为定子相电压幅值;  $s$  为双馈电机的转差率。

文献[12]提出定子电流限制、转子电流限制及稳定性限制下的 DFIG 无功极限,但未考虑 GSC 最大电流限制及 MSC 容量限制。由于双馈式风力发电系统中的双 PWM 变换器(GSC 与 MSC)容量相对较小,也更易由于过载而造成损坏,因此本文将 GSC 与 MSC 的电流及容量作为限制值,分析 DFIG 的无功极限。

(1) GSC 无功极限。

a. 考虑 GSC 最大电流限制。

考虑 GSC 最大电流限制的有功、无功关系为：

$$P_g^2 + Q_g^2 \leq 3U_g^2 I_{gmax}^2 \quad (4)$$

其中,  $U_g$  为 GSC 交流侧线电压有效值,忽略损耗下其与电网线电压有效值相同;  $I_{gmax}$  为 GSC 最大容许电流。

b. 考虑 GSC 设计容量限制。

考虑 GSC 设计容量限制的无功功率最大值  $Q_{gmax}$  与最小值  $Q_{gmin}$  分别为：

$$\begin{cases} Q_{gmax} = \sqrt{S_{gmax}^2 - P_g^2} \\ Q_{gmin} = -\sqrt{S_{gmax}^2 - P_g^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $S_{gmax}$  为 GSC 设计容量。

由上述分析可知,综合考虑 GSC 最大电流限制及 GSC 设计容量限制的 GSC 无功功率最大值  $Q_{gmax}$  为：

$$Q_{gmax} = \min(\sqrt{U_g^2 I_{gmax}^2 - P_g^2}, \sqrt{S_{gmax}^2 - P_g^2}) \quad (6)$$

无功功率最小值  $Q_{gmin}$  为：

$$Q_{gmin} = \max(-\sqrt{U_g^2 I_{gmax}^2 - P_g^2}, -\sqrt{S_{gmax}^2 - P_g^2}) \quad (7)$$

根据不同型号变流器的最大容许电流、设计容量以及接入电网电压的取值范围可知,DFIG 中的变流器均满足  $S_{gmax} \leq U_g I_{gmax}$ ,因此 GSC 无功功率极限

值只需考虑 GSC 设计容量限制即可,如式(5)所示。

(2) DFIG 定子侧无功功率极限。

下面考虑 MSC 最大电流与 MSC 设计容量 2 种限制因素,对 DFIG 定子侧无功功率极限进行讨论。

a. 考虑 MSC 最大电流限制。

恒幅值变换下的定子侧有功功率与无功功率计算公式<sup>[13]</sup>为：

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} |U_s| I_{qs} \\ Q_s = -\frac{3}{2} |U_s| I_{ds} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $I_{ds}$ 、 $I_{qs}$  分别为定子电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。利用文献[12]的推导方法得到恒幅值坐标变换下 MSC 电流  $I_r$  与定子侧有功、无功功率之间的关系为：

$$\left(\frac{2}{3}P_s\right)^2 + \left(\frac{U_s^2}{X_{ss}} + \frac{2}{3}Q_s\right)^2 = \frac{X_m^2 U_s^2}{X_{ss}^2} I_r^2 \quad (9)$$

设  $I_{rmax}$  为 MSC 最大容许电流,则由式(9)得：

$$P_s^2 + \left(\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + Q_s\right)^2 \leq \frac{9}{4} \frac{X_m^2 |U_s|^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 \quad (10)$$

由式(10)可知, MSC 最大电流限制下的定子侧无功功率最大值  $Q_{smax}$  与最小值  $Q_{smin}$  分别为：

$$\begin{cases} Q_{smax} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 - P_s^2} \\ Q_{smin} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} - \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (11)$$

b. 考虑 MSC 设计容量限制。

MSC 设计容量限制下的转子无功功率最大值  $Q_{rmax}$  与最小值  $Q_{rmin}$  分别为：

$$\begin{cases} Q_{rmax} = \sqrt{S_{rN}^2 - P_r^2} \\ Q_{rmin} = -\sqrt{S_{rN}^2 - P_r^2} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $S_{rN}$  为 MSC 设计容量。

将式(1)、(12)代入式(2),得到 MSC 设计容量限制下的定子侧无功功率极限值为：

$$\begin{cases} Q_{smax} = Q_{rmax}/s - Q_\Sigma \approx \sqrt{S_{rN}^2 - (sP_s)^2}/s - \frac{U_s^2}{X_{ss}} \\ Q_{smin} = Q_{rmin}/s - Q_\Sigma \approx -\sqrt{S_{rN}^2 - (sP_s)^2}/s - \frac{U_s^2}{X_{ss}} \end{cases} \quad (13)$$

由上述分析可知,综合考虑 MSC 最大电流限制及 MSC 设计容量限制的发电机定子侧无功功率最大值  $Q_{smax}$  与最小值  $Q_{smin}$  分别为：

$$Q_{smax} = \min\left\{-\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 - P_s^2}, \right.$$

$$\sqrt{S_{rN}^2 - (sP_s)^2} / s - \frac{U_s^2}{X_{ss}} \left\} \quad (14)$$

$$Q_{\min} = \max \left\{ -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} - \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{r\max}^2 - P_s^2}, \right. \\ \left. -\sqrt{S_{rN}^2 - (sP_s)^2} / s - \frac{U_s^2}{X_{ss}} \right\} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可看出,发电机定子发出的无功极限与定子输出的有功功率  $P_s$  及发电机转差率  $s$  有关。根据  $Q_{\max}$  与  $1-s$ 、 $P_s$  间的函数关系,绘制分别以  $1-s$ 、 $P_s$ 、 $Q_{\max}$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三维曲面,如图2所示。由于DFIG转差率通常在  $-0.2 \sim 0.2$  之间,因此  $1-s$  在  $0.8 \sim 1.2$  之间;设发电机额定容量为  $1.5 \text{ MW}$ ,则定子发出的有功功率  $P_s$  在  $0 \sim 1.5 \text{ MW}$  之间。图中,  $Q > 0$  表示发出无功功率。

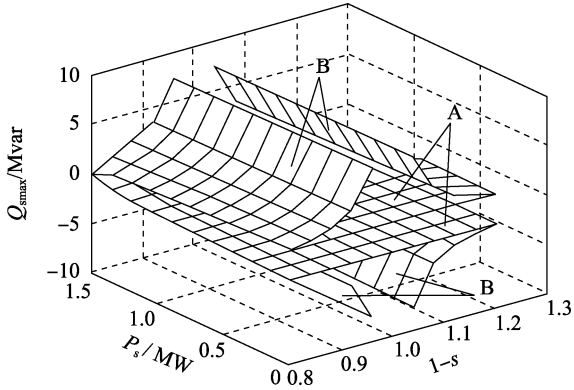


图2 网侧变流器无功功率极限

Fig.2 Maximum value of reactive power of GSC

图2中,A部分为MSC最大电流限制下的无功极限,B部分是发电机容量限制下的无功极限,显然,前者比后者范围更小,因此DFIG定子侧无功功率极限值仅取决于MSC最大容许电流,即如式(11)所示。

(3) DFIG定子侧与GSC侧总无功功率极限。

考虑到GSC的无功输出能力,可知DFIG输出的总无功功率极限值为:

$$\begin{cases} Q_{\max} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{r\max}^2 - P_s^2} + \sqrt{S_{g\max}^2 - P_g^2} \\ Q_{\min} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} - \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{r\max}^2 - P_s^2} - \sqrt{S_{g\max}^2 - P_g^2} \end{cases} \quad (16)$$

## 1.2 提升DFIG无功输出能力的转速控制指令

已知发电机转速标幺值  $\omega_{pu}$  与转差率  $s$  的关系为:

$$s = 1 - \omega_{pu} \quad (17)$$

在忽略定、转子损耗的条件下,  $P_s$ 、 $P_g$  与风轮机输出的机械功率  $P_0$  之间的关系为:

$$P_s = \frac{P_g}{s} = \frac{P_0}{1-s} = \frac{P_0}{\omega_{pu}} \quad (18)$$

$$P_g = sP_s = \frac{sP_0}{1-s} = \frac{(1-\omega_{pu})P_0}{\omega_{pu}} \quad (19)$$

将式(18)、(19)代入式(16)的第1式,得到在忽略定、转子损耗的条件下风力机向电网发出的无功功率最大值为:

$$Q_{\max} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + \sqrt{\frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{r\max}^2 - \left(\frac{P_0}{\omega_{pu}}\right)^2} + \sqrt{S_{g\max}^2 - \left[\frac{(1-\omega_{pu})P_0}{\omega_{pu}}\right]^2} \quad (20)$$

由风力机的空气动力学知,风力机输出的机械功率为:

$$P_0 = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3 = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 C_p \quad (21)$$

其中,  $\rho$  为空气密度,一般为  $1.25 \text{ kg/m}^3$ ;  $S$  为风力机叶片迎风扫掠面积;  $D$  为叶轮直径;  $v$  为空气进入风力机扫掠面之前的风速(即未扰动风速);  $C_p$  为风能利用系数,其工程表达式如式(22)所示。

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\lambda + 1}{7.8 - 0.15\beta}\right) \quad (22)$$

其中,  $\beta$  为桨距角;  $\lambda$  为叶尖速比,可以表示为如式(23)所示的形式。

$$\lambda = \frac{D\Omega}{2v} \quad (23)$$

其中,  $\Omega$  为风轮转速。

$\Omega$  与  $\omega_{pu}$  之间的关系为:

$$\Omega = \frac{2\pi f \omega_{pu}}{pk} \quad (24)$$

其中,  $f$  为额定频率;  $p$  为极对数;  $k$  为齿轮箱传动链变比。

由于桨距角  $\beta$  为  $0^\circ$  时捕获的风功率最大,且桨距角在风轮的实际运行中调节速度缓慢,因此将  $\beta$  设为  $0^\circ$ 。将式(23)、(24)代入式(22)得到:

$$C_p = 0.44 \sin \frac{\pi(2\pi f D \omega_{pu} + 2vpk)}{31.2vpk} \quad (25)$$

将式(25)代入式(21),得到:

$$P_0 = 0.055\pi\rho D^2 v^3 \sin \frac{\pi(2\pi f D \omega_{pu} + 2vpk)}{31.2vpk} \quad (26)$$

将式(26)代入式(20),得到:

$$Q_{\max} = -\frac{3}{2} \frac{|U_s|^2}{X_{ss}} + \left\{ \frac{9}{4} \frac{|U_s|^2 X_m^2}{X_{ss}^2} I_{r\max}^2 - \left[ \frac{0.055 \pi \rho D^2 v^3 \sin \frac{\pi(2\pi f D \omega_{pu} + 2vpk)}{31.2vpk}}{\omega_{pu}} \right]^2 \right\}^{1/2} + \left\{ S_g^2 - \left[ \frac{(1-\omega_{pu}) 0.055 \pi \rho D^2 v^3 \sin \frac{\pi(2\pi f D \omega_{pu} + 2vpk)}{31.2vpk}}{\omega_{pu}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (27)$$

由于式(27)中的  $U_s$ 、 $X_m$ 、 $X_{ss}$ 、 $I_{r\max}$ 、 $\rho$ 、 $D$ 、 $k$ 、 $p$ 、 $S_g$  都为恒定参数,  $v$ 、 $f$  也可实时测得, 仅剩  $Q_{\max}$ 、 $\omega_{pu}$  为未知量, 可将  $Q_{\max}$  看作以发电机转速标么值  $\omega_{pu}$  为自变量的一元函数。为了达到无功功率最大化的目的, 利用式(27)计算出无功功率最大值  $Q_{\max}$  达到最大时对应的转速值, 并将其设为转速指令值, 即面向无功最大化的 DFIG 转速指令。其求解方法为: 将  $U_s$ 、 $X_m$ 、 $X_{ss}$ 、 $I_{r\max}$ 、 $\rho$ 、 $D$ 、 $k$ 、 $p$ 、 $S_g$ 、 $v$ 、 $f$  的实测值代入式(27), 得到以  $\omega_{pu}$  为自变量、以  $Q_{\max}$  为因变量的一元函数; 找出此一元函数的最大值与最大值点, 最大值对应  $Q_{\max}$  的最大值, 最大值点对应面向无功最大化的 DFIG 转速指令。

以 8 ~ 12 m/s 间风速为例, 从  $v = 8$  m/s 开始以 0.5 m/s 的步长求解不同风速下  $Q_{\max}$  与  $\omega_{pu}$  的关系, 得到  $Q_{\max}$  随  $\omega_{pu}$  的变化如图 3 所示, 图中从上至下对应风速逐渐增加的情况。

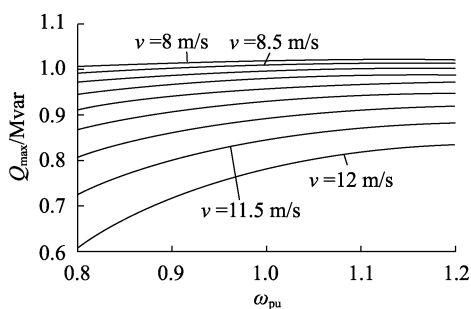


图3 不同风速下无功功率最大值与转速的关系

Fig.3 Relationship of maximum value of reactive power and rotor speed under different wind speeds

由图 3 可知, 风速在 8 ~ 12 m/s 时, 能使  $Q_{\max}$  达最大值的  $\omega_{pu}$  均为 1.2 p.u.。因此, 面向无功最大化的转速控制模式下转速指令值都为 1.2 p.u.。需要说明的是, 在面向无功最大化的转速控制模式下, 并非所有风机和所有风速对应的转速指令值都为 1.2 p.u., 转速指令要利用风机的具体参数, 根据文中所述方法求得。

由图 3 还可看出, 风速较大时,  $Q_{\max}$  的最大值较小。原因分析如下: 由式(26)可作出不同转速情况下(从 0.8 ~ 1.2 p.u. 范围变化)风机输出功率  $P_0$  随风速  $v$  变化的曲线簇, 如图 4 所示。由图 4 可知, 在

任一转速下, 风机输出功率  $P_0$  随着风速  $v$  的提高而增加。

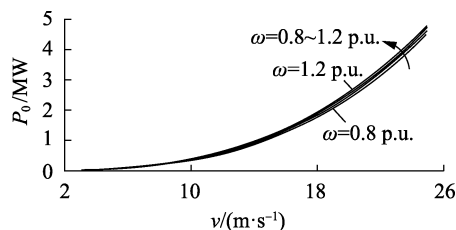


图4 不同转速下风机输出有功功率与风速的关系

Fig.4 Relationship between output power of DFIG and wind speed under different rotor speeds

采用本文定义的符号及参考方向, 在稳态且忽略损耗的情况下 DFIG 转子输出的有功功率  $P_r$  与 GSC(向电网)输出的有功功率  $P_g$  相等, 并且它们与 DFIG 定子输出有功功率  $P_s$  和转差率  $s$  的关系为  $P_r = P_g = sP_s$ , 风机输出功率  $P_0 = P_s + P_r = P_s + P_g = (1-s)P_s$ 。相同转速下,  $s$  不变, 当风速增加而导致  $P_0$  增加时,  $P_s$  相应增加; 又由  $P_g = sP_s$  可知, 无论  $s$  是否大于 0,  $|P_s|$  都随  $|P_g|$  增大而增加。因此, 风速增大时  $P_0$  增加,  $P_s^2$  与  $P_g^2$  也相应增加。由式(16)可知, 在  $U_s$ 、 $X_m$ 、 $X_{ss}$ 、 $I_{r\max}$ 、 $S_{g\max}$  都为常数时, 风机可输出的无功功率最大值  $Q_{\max}$  随  $P_s^2$ 、 $P_g^2$  增加而减小。因此, 当风速增大导致  $P_s^2$  与  $P_g^2$  增加时, 无功最大值  $Q_{\max}$  减小。同理, 当风速减小时, 无功最大值  $Q_{\max}$  增加。

## 2 提升无功调节能力的 DFIG 转速变模式控制

### 2.1 机组内部的无功指令分配

由于 DFIG 定子侧的无功功率实际上是通过转子侧变流器来控制的, 而转子侧变流器仅需处理转差功率即可, 因此在风电机组内部分配无功功率时, 采用“定子优先原则”<sup>[13]</sup>。本文采用的 DFIG 定子及 GSC 无功功率指令分配方法如图 5 所示。

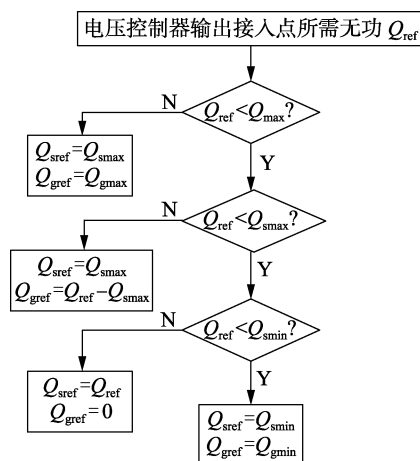


图5 DFIG 定子及 GSC 无功功率分配流程图

Fig.5 Assignment of reactive power of stator and GSC for DFIG

图 5 中,  $Q_{ref}$  为单台风电机组的无功指令;  $Q_{sref}$  为

DFIG 定子侧无功功率指令;  $Q_{\text{gref}}$ 、 $Q_{\text{gmax}}$  与  $Q_{\text{gmin}}$  分别为 GSC 无功功率指令、GSC 能够发出的最大与最小无功。

利用式 (5)、式 (11) 与式 (16) 计算出两侧 (DFIG 定子侧和 GSC 侧) 的无功极限以及风电机组的总无功极限, 根据上述流程图的方法将无功指令值与无功极限值进行比较, 得到两侧的无功指令  $Q_{\text{sref}}$  与  $Q_{\text{gref}}$ , 分别作为 MSC 和 GSC 的无功控制指令, 控制两侧的无功功率, 使其达到指令值。

## 2.2 转速变模式控制策略

根据 1.2 节提出的转速指令计算方法及 2.1 节提出的 DFIG 定子侧及 GSC 侧无功功率指令分配方法, 结合 MPPT 控制下的风电机组转速控制技术, 建立了一种实现无功最大化的 DFIG 转速变模式控制策略, 如图 6 所示, 其原理阐述如下。

根据风力发电机接入点电压  $U$ , 电压控制器计算出 DFIG 的无功功率指令  $Q_{\text{ref}}$ ; 将  $Q_{\text{ref}}$  输入机组内部无功分配模块, 利用 2.1 节的分配方法得到 DFIG 定子侧无功指令  $Q_{\text{sref}}$  及 GSC 侧无功指令  $Q_{\text{gref}}$ ; 利用 MPPT 模式下无功最大值计算模块计算 MPPT 控制模式下 DFIG 向电网发出的无功功率最大值  $Q_{\text{max0}}$ ; 当电网电压正常或存在轻度偏差时, 即  $Q_{\text{ref}} < Q_{\text{max0}}$  时, 采用 MPPT 控制模式, 此时图中转速指令切换开关位于“0”, 发电机转速指令值取 MPPT 控制模式下的转速指令值  $\omega_{\text{ref0}}$ ; 当电网电压下降至 MPPT 控制模式下的最大无功输出无法满足无功补偿要求, 即  $Q_{\text{ref}} \geq Q_{\text{max0}}$  时, 此时图中转速指令切换开关位于“1”, 发电机转速指令值  $\omega_{\text{ref}}$  取 1.2 节所述方法计算的转速指令  $\omega_{\text{ref1}}$ , 在这种情况下发电机由 MPPT 控制模式切换为无功最大化控制模式。

## 3 算例分析

采用 PSCAD 数字仿真软件搭建双馈式风力发电系统并网模型进行算例验证, 模型参数见表 1。

工况 1: 风速变化, 验证面向无功最大化的转速

控制模式下机组无功输出能力的优越性。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| 设备  | 参数名称                                     | 参数值     |
|-----|------------------------------------------|---------|
| 风力机 | 空气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 1.225   |
|     | 切入风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  | 3       |
|     | 切出风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  | 25      |
|     | 额定风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  | 10      |
|     | 传动比                                      | 104     |
|     | 叶片数                                      | 3       |
|     | 叶片直径/m                                   | 77      |
|     | 桨距角/( $^{\circ}$ )                       | 0       |
| 齿轮箱 | 极对数                                      | 2       |
|     | 齿轮箱传动比                                   | 104     |
| 发电机 | 额定功率/MW                                  | 1.5     |
|     | 额定电压/kV                                  | 0.69    |
|     | 转子电流最大值/kA                               | 1.45    |
|     | 定子漏抗 $X_l/\Omega$                        | 0.026   |
|     | 激磁电抗 $X_m/\Omega$                        | 1.456 9 |
| 变流器 | GSC 额定容量/( $\text{MV} \cdot \text{A}$ )  | 0.37    |

风速初始值为  $8 \text{ m/s}$ , 在  $16 \sim 20 \text{ s}$  期间由  $8 \text{ m/s}$  渐变为  $10 \text{ m/s}$ , 在  $30 \text{ s}$  由  $10 \text{ m/s}$  突变至  $12 \text{ m/s}$ 。

分别采用面向无功最大化的转速控制模式 (模式 1) 与 MPPT 控制模式 (模式 2), 仿真结果如图 7 所示, 图中转速为标么值, 后同。

由图 7(b) 可看出, MPPT 控制模式下的转速先稳定在  $0.93 \text{ p.u.}$  左右, 在  $16 \sim 20 \text{ s}$  风速由  $8 \text{ m/s}$  渐变为  $10 \text{ m/s}$  及  $30 \text{ s}$  风速由  $10 \text{ m/s}$  突变为  $12 \text{ m/s}$  时转速上升; 面向无功最大化的转速控制模式下的转速始终稳定在转速指令值  $1.2 \text{ p.u.}$  (由 1.2 节可知, 面向无功最大化的转速指令值在  $8 \sim 12 \text{ m/s}$  之间的任意风速下, 其转速指令值都为  $1.2 \text{ p.u.}$ , 所以此工况下面向无功最大化的转速指令值始终为  $1.2 \text{ p.u.}$ )。

由图 7(c) 可看出, 风速由  $8 \text{ m/s}$  渐变为  $10 \text{ m/s}$  的过程中, 2 种模式下的机组无功容量 (即无功功率最大值) 都平滑减小; 风速由  $10 \text{ m/s}$  突变为  $12 \text{ m/s}$  的过程中, 在 2 种控制模式下机组的无功容量都骤降。  $8 \text{ m/s}$  风速下, 面向无功最大化的转速控制模

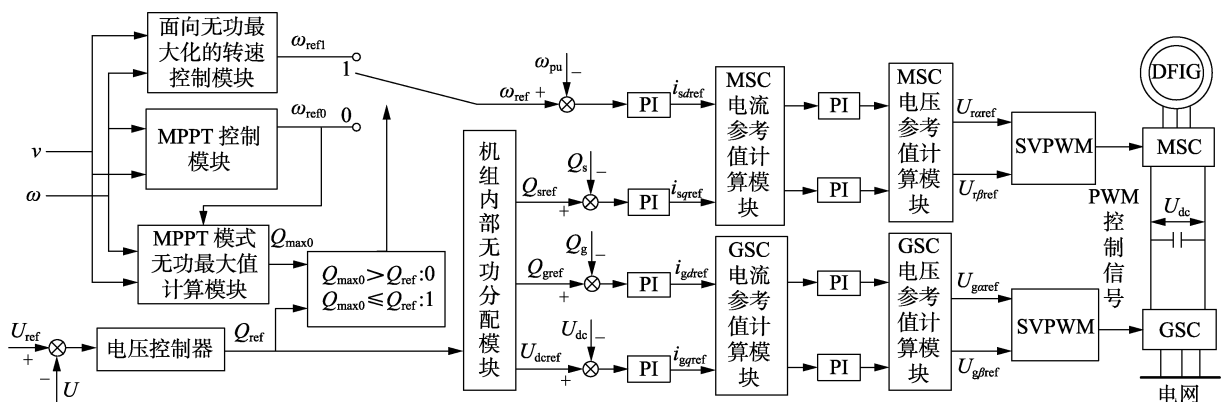
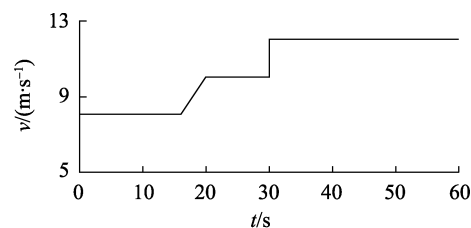
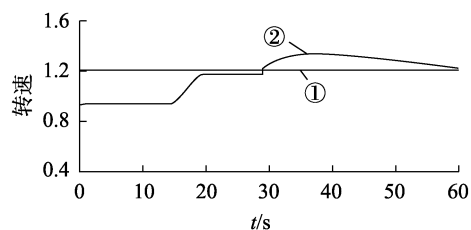


图 6 DFIG 无功最大化转速变模式控制策略

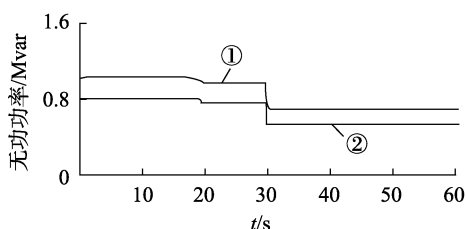
Fig.6 Variable rotor speed mode control strategy of DFIG for reactive power maximization



(a) 风速



(b) 发电机转速



(c) 无功功率最大值

①面向无功最大化的转速控制模式,②MPPT控制模式

图7 2种控制模式仿真结果

Fig.7 Simulative results of two control modes

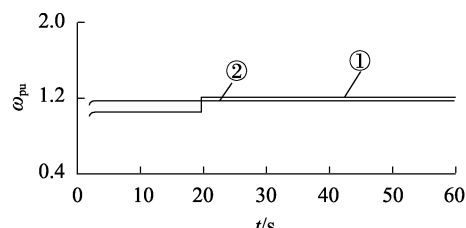
式下的无功功率最大值为 1.07 Mvar, MPPT 控制模式下的无功功率最大值为 0.81 Mvar, 前者较后者输出的无功功率增加了 32%; 10 m/s 风速下, 面向无功最大化的转速控制模式下的无功功率最大值为 0.97 Mvar, MPPT 控制模式下的无功功率最大值为 0.75 Mvar, 前者较后者输出的无功功率增加了 29%; 12 m/s 风速下, 面向无功最大化的转速控制模式下的无功功率最大值为 0.73 Mvar, MPPT 控制模式下的无功功率最大值为 0.52 Mvar, 前者较后者输出的无功功率增加了 40%。

由工况 1 的分析可知, 在风速变化的情况下, 面向无功最大化的转速控制模式较传统 MPPT 控制模式有更大的无功容量, 进而有更强的无功调节能力。

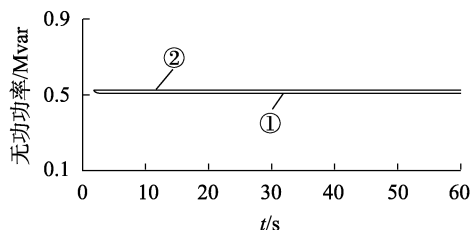
工况 2: 无功指令值变化, 验证转速变模式控制策略无功输出能力的优越性。

设 DFIG 无功指令  $Q_{ref}$  初始值为 0.7 Mvar, 20 s 后突变为 0.9 Mvar, 分别采用转速变模式控制策略与传统的 MPPT 控制策略, 仿真结果如图 8 所示。

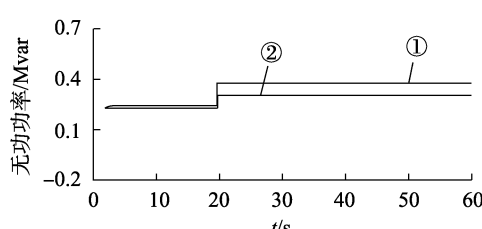
由图 8(a) 可知, 风速固定时, 传统的 MPPT 控制策略下发电机转速不随无功需求变化, 始终稳定在 1.05 p.u.; 转速变模式控制策略下的发电机转速有可能随无功需求而变: 在无功指令  $Q_{ref}$  为 0.7 Mvar, 未超出 MPPT 控制模式下的无功功率最大值时, 采用传统的 MPPT 控制模式, 实际转速与 MPPT 控制下的转速指令值一致; 在无功指令  $Q_{ref}$  变为 0.9



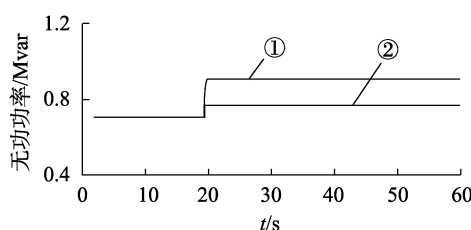
(a) 发电机转速



(b) MSC 发出的无功功率



(c) GSC 发出的无功功率



(d) 机组发出的无功

①转速变模式控制策略,②MPPT控制策略

图8 2种控制策略仿真结果

Fig.8 Simulative results of two control strategies

Mvar 时, 如果仍采用 MPPT 模式, 将不能满足无功输出要求, 因此 DFIG 切换为面向无功最大化的转速控制模式, 实际转速与面向无功最大化的转速控制模式下的转速指令一致, 为 1.2 p.u. (由 1.2 节的分析可知 10 m/s 风速下的转速指令值为 1.2 p.u.)。

由图 8(b)、(c) 可看出, 2 种控制策略下 MSC 发出的无功功率几乎一致。MPPT 控制模式下, GSC 发出的无功功率在 20 s 时由 0.23 Mvar 突升为 0.29 Mvar; 转速变模式控制下, GSC 发出的无功功率在 20 s 时由 0.24 Mvar 突升为 0.38 Mvar。由此看出, 转速变模式控制策略由 MPPT 控制模式切换为面向无功最大化的转速控制模式时, 主要增大了 GSC 侧的无功容量。2 种控制策略都采用了 2.1 节所述的电网侧无功分配方法, 以定子侧 (MSC 控制其发出的无功) 优先, 在定子侧的无功功率满发之后再由 GSC 侧发出无功。

图 8(d) 为发电机输出无功功率, 由图可知, 当电网电压偏差较小, 无功指令  $Q_{ref}$  未超出 MPPT 控制

模式下的无功功率输出能力时,为保证风电机组向电网输出最多的有功功率,转速变模式控制策略采用 MPPT 控制模式,此时风电机组可充分发挥其有功输出能力,但此模式下 DFIG 无功容量较小,为 0.78 Mvar;在 20 s 时,无功指令由 0.7 Mvar 突变为 0.9 Mvar,MPPT 控制模式无法满足电网的无功需求,此时切换至面向无功最大化的转速控制模式,无功容量增大,DFIG 可以发出满足电网需求的无功功率。

由工况 2 的分析可知,当电网电压正常或越限较小时,转速变模式控制策略采用 MPPT 控制模式,即可保证风电机组向电网输出最多的有功功率,又可及时满足电网因电压越限而产生的无功需求;当电网电压越限严重,导致 MPPT 控制模式下的无功容量无法满足电网的无功需求时,转速变模式控制策略切换为面向无功最大化的转速控制模式,此时 DFIG 无功容量增大,无功输出能力增强,可及时满足电网的无功需求。

工况 3:电网电压越下限,验证转速变模式控制策略的电压调节效果。

设风电机组并网点初始电压为 1 p.u.,在 4 s 突变为 0.8 p.u.,由于并网点额定电压实际值为 10 kV,该等级下的电网电压波动范围规定在  $\pm 7\%$ ,因此电压低于 0.93 p.u. 时为越下限。采用转速变模式控制策略的仿真结果如图 9 所示。

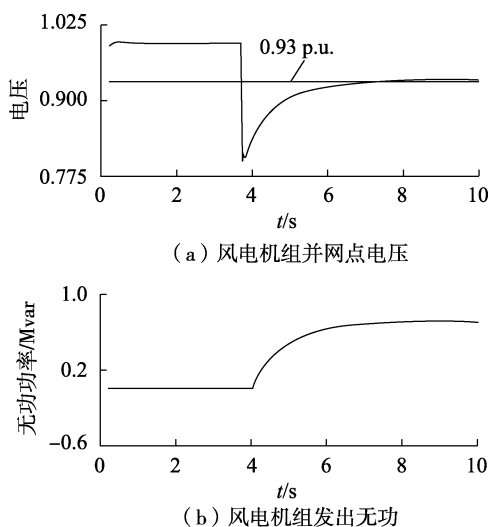


图9 采用转速变模式控制策略的仿真结果

Fig.9 Simulative results of variable motor speed mode control strategy

由图 9 可看出,电网电压处于正常波动范围内时,风电机组为单位功率因数控制,不发出无功功率;在 4 s 电网电压突降至 0.8 p.u.,超出正常范围时,机组发出无功功率,并且快速上升,直到风机并网电压恢复至正常电压范围的下限 0.93 p.u.后,机组发出的无功功率不再上升,保持在 0.72 Mvar 左右。

由工况 3 的分析可知,转速变模式控制策略在电网电压正常时保持传统的单位功率因数控制,作为有功电源最大限度地向电网提供有功功率;在电网电压越限时,及时恢复电压正常成为首要任务,此时使风电机组参与到电网的无功电压调节中,通过调节机组自身发出的无功功率使机组并网点电压及时恢复正常,保证了电网电压质量和电力系统的稳定性与可靠性。

## 4 结论

本文提出了一种基于 DFIG 转速指令计算的风电机组转速变模式控制策略。仿真结果表明,采用此控制策略后的双馈式风力发电系统在电网电压正常的情况下以 MPPT 为重点,向电网提供充足的有功功率;在电网电压下降显著的情况下以尽快恢复电压正常为重点,通过切换转速控制模式,增强风电机组的无功输出能力,向电网提供尽可能多的无功功率。

本文控制策略深度挖掘并利用了 DFIG 的无功输出能力,有效地使 DFIG 参与到配电网无功电压调节中,减小了配电网中无功补偿设备的压力,提高了无功电压调节的灵活性与经济性,对分散式接入配电网的风电机组无功功率分配与控制具有借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 孙真真. 分散式接入配电网的电压稳定性研究及无功电压控制[D]. 上海: 东华大学, 2015.  
SUN Zhenzhen. Study on the voltage stability of distributed wind power access to distribution network and reactive power and voltage control[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [2] 刘其辉, 赵亚男, 毛未. 分散式风电 AVC 策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 201-207.  
LIU Qihui, ZHAO Yanan, MAO Wei. AVC strategy for distributed wind-power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 201-207.
- [3] 孙伟伟, 付蓉, 陈永华. 计及无功裕度的双馈风电场无功电压协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 81-85.  
SUN Weiwei, FU Rong, CHEN Yonghua. Coordinated var and voltage control of doubly-fed wind farm considering reactive power margin[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 81-85.
- [4] 黄松柏. 考虑风电机组无功调节能力的配电网有功/无功联合调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 44-49.  
HUANG Songbai. Coordinated active/reactive power dispatch considering reactive-power regulation capability of wind turbine for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 44-49.
- [5] HUANG Yafeng, YAN Gangui, CHAO Chuyan, et al. Mining and utilization of reactive power capability of doubly fed induction generator systems for wind turbines[C]// International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. Nanjing, China: IEEE, 2009: 1-5.
- [6] XU Dianguo, LI Rui, LIU Yicheng, et al. Reactive power analysis

- and control of doubly fed induction generator wind farm[C]// European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. Barcelona, Spain; IEEE, 2009; 1-10.
- [7] 刘其辉, 王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 82-89.  
LIU Qihui, WANG Zhiming. Reactive power generation mechanism & characteristic of doubly fed variable speed constant frequency wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 82-89.
- [8] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 39-44.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Steady-state power relation of AC-excited variable-speed constant frequency doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 39-44.
- [9] AGHATEHRANI R, FAN L, KAVASSERI R. Coordinated reactive power control of DFIG rotor and grid sides converters[C]// Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. [S.l.]: IEEE, 2009; 1-6.
- [10] MOURS I M E, JOOS G, ABBEY C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1178-1190.
- [11] KIM Y S, WOND J. Mitigation of the flicker level of a DFIG using power factor angle control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2457-2458.
- [12] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.  
JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 87-92.
- [13] 段建民, 王志新, 王承民. 考虑风电接入的配电网集中-分布式无功电压控制[J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(3): 271-276.  
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin. Centralized-distributed reactive power/voltage control in distribution system incorporating wind power[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2012, 28(3): 271-276.
- [14] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119.  
XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 112-119.
- [15] 王耀辉. 双馈风力发电机的无功功率控制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.  
WANG Yaohui. Reactive power control for doubly fed induction generator[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [16] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.  
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.

#### 作者简介:



刘其辉

刘其辉(1974—),男,北京人,副教授,博士,研究方向为 DFIG 运行控制技术(E-mail: liuqihufei@163.com);

毛未(1993—),女,陕西西安人,硕士,研究方向为 DFIG 运行控制(E-mail: 1940675695@qq.com);

高瑜(1994—),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为 DFIG 运行控制(E-mail: 374717659@qq.com)。

## Variant mode control strategy of rotor speed for DFIG in promoting reactive power adjustment ability

LIU Qihui, MAO Wei, GAO Yu

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The reactive power flow change of distribution network brought by the access of dispersed wind turbines may easily cause the voltage deviation, due to the weak reactive power and voltage adjustment ability of distribution network itself, it has become an important adjustment task for the dispersed wind turbines to restore the bus voltage to normal level in time. A variant mode control strategy of rotor speed for DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) is proposed at the cost of temporary sacrifice of maximum wind power tracking. Firstly, taking the maximum reactive power limits of the units as the control objective, the relationship among the maximum reactive power transported to the power grid by the dispersed wind turbines, the wind speed and the rotor speed of the generators is searched to obtain the rotor speed instruction value. Then the reactive power allocation scheme among the wind turbines is determined according to the control objective and the other constraints. Finally, the control strategy is made with the combination of the traditional control algorithms. The simulative results of PSCAD verify the effectiveness of the proposed control strategy.

**Key words:** wind power; DFIG; rotor speed control; reactive power; maximization