

# 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略

Reactive Power Analysis and Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Farm  
哈尔滨工业大学电气工程系 徐殿国, 郎永强, 张学广, 马洪飞, Hadianmrei S.R  
Email: [xudiang@hit.edu.cn](mailto:xudiang@hit.edu.cn)

**摘要:** 提出一种双馈电机风力发电系统无功极限的计算方法, 该方法以双馈电机风电系统的功率关系为基础, 考虑了网侧变换器在其功率允许范围内的无功发生能力, 系统动态无功极限为定子与网侧变换器的无功极限之和。对双馈电机风电场在强电网无功调节中的应用进行了探讨, 提出双馈电机风电场对当地用户进行就近无功补偿的策略, 并给出相应的无功分配策略, 包括风电场各风机之间以及单台风电机组定子和网侧变换器之间的无功分配原则。双馈电机风电场在实现变速恒频优化运行的同时, 充分发挥了风电机组和整个风电场的无功处理能力, 使其参与所连电网的无功调节。

**Abstract:** A method is proposed to calculate the reactive power limit of DFIG (doubly fed induction generator) wind power generation system based on the power relationships of overall system. Considering the reactive power capacity of the grid side converter, total reactive power includes reactive power of both stator and the converter. Reactive power regulation application of DFIG wind farm in the grid has been studied. A reactive power compensation strategy for the local user using DFIG wind farm has been developed and the distribution algorithms of reactive power demand are given which includes that for distribution among DFIG wind power systems in the farm and that for distribution between stator and the grid side converter in one generation unit. With VSCF (variable speed and constant frequency) optimum operation of each generation unit, DFIG wind farm contributes to the reactive power regulation in the grid at its full reactive power capacity.

**关键词:** 风力发电; 双馈电机; 变速恒频; 无功功率极限; 无功补偿

**Keywords:** wind power generation system; doubly fed induction generator; variable speed and constant frequency; reactive power limit; reactive power compensation

## 1 引言

随着风电机组单机容量和风电场规模的增大, 风力发电机与电网之间的相互影响越来越大。为了保证并网后电网和风电机组的运行效率、安全性和稳定性, 风电机组与电网之间的控制问题显得尤为重要<sup>[1]</sup>。交流励磁双馈电机变速恒频风力发电技术是目前最有前景的风力发电技术之一, 已成为国内、外该领域研究的热点。此方案最大的优点是减小了功率变换器的容量, 降低了成本<sup>[2-4]</sup>, 且可以实现有功、无功的独立灵活控制<sup>[5-8]</sup>。

通过控制电网中的无功功率可以对电网电压进行调整<sup>[9-10]</sup>。由双馈电机风电机组组成的风电场作为重要的无功源, 应该在稳定电网电压和补偿无功方面发挥应有的作用。稳定电网电压的方法很多, 通过控制中枢点的电压就是其中之一。但要求可控无功功率较大, 一般适合大型双馈电机风电场连接弱电网的情况。当双馈电机风电场连接强电网时, 由于其发出或吸收无功能力的限制, 不能独立承担电网电压的调整。为了发挥其无功功率的调节能力, 可以使其参与所连电网的无功调节, 缓解电网的无功压力。利用双馈电机风电场发出或吸收无功功率可以对当地无功消耗用户起到就近补偿的作用。通过对双馈电机风电场无功发生能力的分析, 选择所连电网中某一节点进行无功控制, 可以对该点之后连接的所有用户消耗

的无功进行动态补偿。

## 2 双馈电机风电场的功率分析

### 2.1 双馈电机风力发电系统的功率关系

在双馈电机变速恒频风力发电方案中, 定子直接接入电网, 转子通过交一直一交(AC-DC-AC)变换器与电网相连。交一直一交(AC-DC-AC)变换器由两个背靠背连接的电压型PWM变换器构成: 靠近双馈电机转子一侧的称为转子侧变换器, 靠近电网一侧的称为网侧变换器。网侧变换器一般运行在高功率因数整流模式, 为转子侧变换器提供恒定的直流母线电压; 转子侧变换器通过控制转子电流电压, 实现双馈电机的变速恒频运行。双馈电机变速恒频风力发电系统功率关系如图1所示。

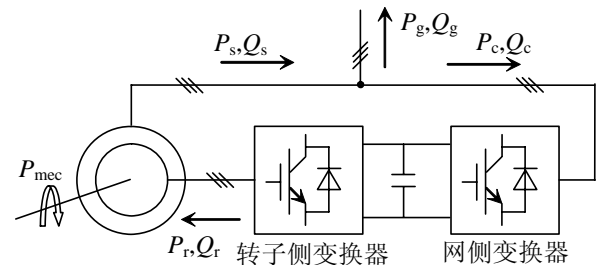


图1 双馈电机变速恒频风力发电系统功率关系  
Fig. 1 Power relationships of DFIG variable speed constant frequency wind power system

图中,  $P_{mec}$ 为风力机输入的机械功率;  $P_s$ 、 $Q_s$ 为定子发出的有功功率和无功功率;  $P_c$ 、 $Q_c$

为网侧变换器从电网输入的有功功率和无功功率； $P_g$ 、 $Q_g$ 为双馈电机风电系统流入电网的有功功率和无功功率。

忽略电机定、转子绕组的损耗，双馈电机机械功率、定子侧有功功率之间的关系为

$$P_{mec} = P_s - P_r \quad (1)$$

转子侧有功功率为定子侧有功功率的转差功率，则

$$P_s = P_{mec} / (1 - s) \quad (2)$$

$$P_r = s P_{mec} / (1 - s) \quad (3)$$

风力机输入的机械功率 $P_{mec}$ 取决于风力机捕获风能的大小<sup>[1,8]</sup>，与风力机转速控制规律有关。目前变速恒频风电机组的转速控制规律通常是为了提高风力机的风能转化效率，更多的增加风力机的功率输出。不同厂家对自己不同的产品有不同的功率风速曲线。由式(3)可知输入的机械功率按转差率在定、转子之间分配。

忽略功率变换器的开关损耗和线路损耗，根据能量守恒原理，网侧变换器稳态时从电网输入的有功功率等于转子侧变换器输出到双馈电机转子的有功功率，即

$$P_c = P_r \quad (4)$$

由式(3)可知转子侧有功功率的方向与转差率的符号有关，当转差率为正，双馈电机运行在亚同步状态， $P_r(P_c)$ 为正，即转子从电网吸收所需的转差功率；当转差率为负，双馈电机运行在超同步状态，转子通过变换器向电网发出转差功率；当转差率为零时，双馈电机处于同步运行状态，此时 $P_r(P_c)$ 为零，转子侧变换器通过转子向双馈电机仅提供直流励磁<sup>[11]</sup>。

忽略系统损耗，根据图1所定义的功率流动方向，风电系统输入到电网的有功功率与风力机输入的机械功率相等，即

$$P_g = P_s - P_c = P_{mec} \quad (5)$$

根据双馈电机的数学模型可以推导出定、转子无功功率之间的关系为<sup>[12]</sup>

$$Q_r = 3\omega_2 L_r I_r^2 / 2 + s(3\omega_1 L_s I_s^2 / 2 + Q_s) \quad (6)$$

式中： $I_s$ 、 $I_r$ 分别为定、转子电流的峰值； $L_s$ 、 $L_r$ 分别为定、转子电感(漏感和励磁电感之和)； $\omega_1$ 为定子电流角频率； $\omega_2$ 为转差角频率。

由式(6)可看出，双馈电机转子端输入的无功功率除提供给转子绕组外，还负责按一定比例(转差率)向定子绕组传递一部分无功。无功的大小可理解为定子侧无功功率的转差无功。因此转子无功功率实际是为了满足双馈电机

励磁和定子侧无功功率的控制而由转子变换器提供的。

同时需要强调的是，由于转子变换器(AC-DC-AC)中直流环节的存在，两侧变换器之间只交换有功功率，无功功率 $Q_c$ 和 $Q_r$ 是互相解耦的。

根据图1所定义的功率流动的方向，风电机组系统输入到电网的无功功率为

$$Q_g = Q_s - Q_c \quad (7)$$

双馈电机风电系统的功率分析有助于在系统设计中交流励磁变换器的容量选择：根据转子最大视在功率确定转子侧变换器的容量；根据转子侧最大有功功率确定网侧变换器的容量。

## 2.2 双馈电机风电场的功率关系

设风电场共有 $n$ 台双馈电机风电机组，其中，第 $i$ 台风电系统向电网输送的有功功率和无功功率分别为 $P_{gi}$ 、 $Q_{gi}$ ，则整个风场的功率为各个风电系统功率之和。风电场的有功功率为

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n P_{gi} \quad (8)$$

无功功率为

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_{gi} \quad (9)$$

## 3 双馈电机风电场无功功率极限的分析

### 3.1 双馈电机风电系统的无功功率极限

#### 3.1.1 双馈电机定子侧无功功率极限

采用幅值不变的3/2坐标变换时，双馈电机定子端功率在电网电压定向同步 $dq$ 坐标系下的表达式为<sup>[13-14]</sup>

$$P_s = 3U_s i_{sd} / 2 \quad (10)$$

$$Q_s = -3U_s i_{sq} / 2 \quad (11)$$

式中： $U_s$ 为定子电压峰值，并网之后等于电网电压，为一恒值； $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 为定子电流 $d$ 、 $q$ 轴分量。

忽略定子电阻上的压降，稳态时定子磁链落后定子电压 $90^\circ$ 且为恒值，电网电压定向同步 $dq$ 坐标系下， $d$ 轴分量为零， $q$ 轴分量为恒值(定子磁链的额定值)，即

$$\begin{cases} \psi_{sd} = 0 \\ \psi_{sq} = -\psi_s = -U_s / \omega_1 \end{cases}$$

式中： $\psi_s$ 为定子总磁链。

根据双馈电机的数学模型可以导出转子电流和定子功率之间的关系<sup>[15]</sup>:

$$i_{rd} = 2P_s L_s / (3U_s L_m) \quad (12)$$

$$i_{rq} = -2Q_s L_s / (3U_s L_m) - U_s / (\omega_1 L_m) \quad (13)$$

式中:  $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$ 为转子电流 $d$ 、 $q$ 轴分量。

双馈电机定子侧有功功率和无功功率运行范围受定、转子绕组和转子侧变换器的电流限制影响,但起主要作用的是转子侧变换器的电流限制<sup>[5]</sup>:

$$\left(\frac{L_s}{L_m} \frac{2}{3U_s} P_s\right)^2 + \left(\frac{L_s}{L_m} \frac{2}{3U_s} Q_s + \frac{U_s}{\omega_1 L_m}\right)^2 = i_r^2 \leq I_{rmax}^2 \quad (14)$$

式中:  $i_r^2 = i_{rd}^2 + i_{rq}^2$ ;  $I_{rmax}$ 为转子侧变换器的电流最大值。整理得:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s}\right)^2 \leq \left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 \quad (15)$$

因此对于给定有功功率 $P_s$ 的情况下,定子无功功率的范围为

$$Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \quad (16)$$

式中:

$$Q_{smin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \quad (17)$$

$$Q_{smax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \quad (18)$$

显然给定风速下(即定子发出的有功功率一定),定子发出和吸收无功的能力是不对称的。

### 3.1.2 网侧变换器的无功功率极限

网侧变换器实际是一个电压型PWM整流器,交流侧具有独特的受控电流源特性,可实现四象限运行。网侧变换器通常运行在单位功率因数状态( $Q_c=0$ ),容量的选择只需考虑双馈电机最大转差有功功率。实际上,由于风力机随风速的变化而作变速运行,使风力机并不总是运行在最大转差功率的工作点上。当风力机运行在低风速时,网侧变换器工作在欠功率状态,并没有充分发挥其功率处理能力。当系统对无功功率有要求时,可考虑让网侧变换器在功率允许范围内工作在非单位功率因数模式。

网侧变换器的功率一般按风电系统的最大转差有功功率设计,并考虑各种损耗(线路损耗、开关损耗等)。设网侧变换器设计的最大功率为 $P_{cmax}$ ,其发生或吸收的无功功率能力可以由 $Q_c^2 + P_c^2 = P_{cmax}^2$ 计算,为

$$-\sqrt{P_{cmax}^2 - P_c^2} \leq Q_c \leq \sqrt{P_{cmax}^2 - P_c^2} \quad (18)$$

简写为

$$Q_{cmin} \leq Q_c \leq Q_{cmax} \quad (19)$$

根据式(3)则有:

$$Q_{cmin} = -\sqrt{P_{cmax}^2 - [s/(1-s)]^2 P_{mec}^2} \quad (20)$$

$$Q_{cmax} = \sqrt{P_{cmax}^2 - [s/(1-s)]^2 P_{mec}^2} \quad (21)$$

从而考虑网侧变换器无功发生能力时,双馈电机变速恒频风电系统向电网发出的无功功率为

$$Q_{gmax} = Q_{smax} - Q_{cmin} \quad (22)$$

$$Q_{gmin} = Q_{smin} - Q_{cmax} \quad (23)$$

图2为额定功率800kW的某双馈电机风电系统无功功率极限与有功功率的关系曲线。图中曲线1为不考虑网侧变换器无功发生能力时系统的无功极限;曲线2则是考虑网侧变换器无功发生能力后系统的无功极限。

该双馈电机的参数如下:  $R_s=4.972m\Omega$ ,  $R_r=4.774m\Omega$ ,  $X_r=1.499\Omega$ ,  $X_r=1.475\Omega$ ,  $X_m=1.417\Omega$ 。 $P_{cmax}$ 取最大转差有功功率的120%,  $I_{rmax}$ 为额定转子电流的120%。

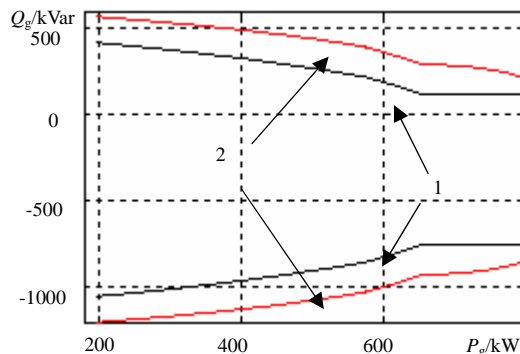


图2 双馈电机风电系统无功功率极限

Fig. 2 Reactive power limit of DFIG wind power system

### 3.2 风电场无功功率极限

对于有 $n$ 台双馈电机风电机组的风电场,整个风电场总的无功发生极限为

$$Q_{totalmax} = \sum_{i=1}^n Q_{gi max} \quad (24)$$

$$Q_{totalmin} = \sum_{i=1}^n Q_{gi min} \quad (25)$$

式中:  $Q_{gi max}$ 和 $Q_{gi min}$ 为第 $i$ 台风电机组的无功发生极限;  $Q_{totalmax}$ 为风电场总的无功极限。

## 4 双馈电机风电场无功功率控制策略

### 4.1 控制方案

风电场的有功功率控制策略仍以最大捕捉风能为目标,各风机根据实际风速大小按一

定转速控制规律由各自的控制系统实现，而无功功率则由风场的监控系统统一控制。

由双馈电机风电机组成的风电场，具备一定的无功功率吸收和发出能力，不但作为有功电源向电网发出电能，也可作为无功电源稳定电网电压或对相邻无功消耗用户起无功补偿作用。

并网风电场对电网接入点电压的影响与电网的强弱直接相关，电网的强弱是一个相对的概念。假设电网在接入点的短路容量为 $S_{sc}$ ，对于额定功率为 $P$ 的风电场，比值 $R_{sc}=S_{sc}/P$ 是衡量电网强弱的一个指标。如果 $R_{sc}>20$ ，所连电网通常视为强电网<sup>[16]</sup>。

当并网电网为弱电网时，风电场输出功率的变化对电网电压的影响较大。此时可以通过控制风电场的无功功率来实现对电网电压的调整，维持整个电网的稳定，即端电压恒定控制方式。当风电场的规模相对较小时，输出功率的变化对电网电压的影响可以忽略。由于其发出或吸收无功能力的限制，不能独立承担电网电压的调整作用，通常采用功率因数恒定控制模式。这种控制方案并没有充分发挥该类型风电场无功的调节能力。

当并网电网为强电网时，为了充分发挥双馈电机风电场的无功处理能力，可以考虑其对当地无功用户就近补偿的作用。根据双馈电机风电场无功极限情况，选择所连电网中某一节点进行无功控制，通过对风电场发出无功功率的调节，可以对该点之后连接的所有用户消耗的无功进行动态补偿。示意图如图3所示。

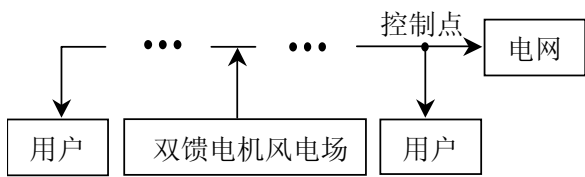


图3 双馈电机风电场进行无功补偿时系统示意图  
Fig. 3 Sketch map for reactive power compensation application of DFIG wind farm

整体的控制方案如图4所示。风电场由若干双馈电机风电机组成，每台风电机组有自己独立的控制系统，实现变速恒频运行条件下最大风能捕捉的同时，具备系统有功、无功的独立调节能力。风电场内所有风电机组的控制系统通过内部网络与风场的监控系统相连。监控系统由一台工业控制计算机实现，一方面负责监测风场中每一台风机的运行情况，另一方面通过一定的通讯方

式与上一级电网调度系统交换数据。电网调度系统通过风电场整体的运行数据信息和电网无功需求，向风场监控系统下达无功功率参考命令。

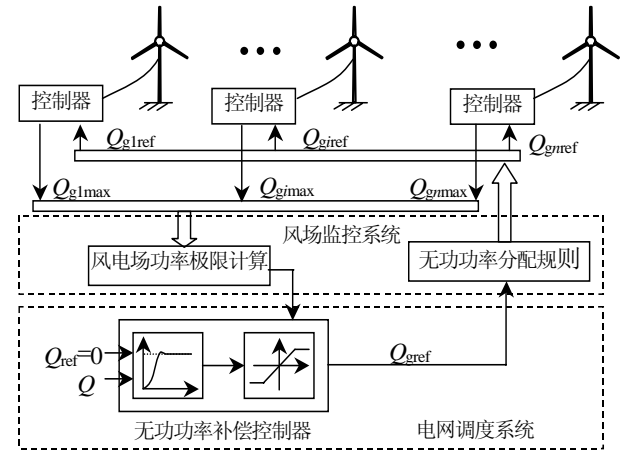


图4 双馈电机风电场进行无功补偿时的控制方案  
Fig.4 Scheme for reactive power compensation application of DFIG wind farm

双馈电机风电场中每台风电机组的控制系统实时计算出该机组动态无功发生极限 $Q_{gimax}$ ，并通过通讯方式传送给风场的监控系统。监控系统根据每台机组的无功发生能力，计算出整个风场的无功发生极限 $Q_{totalmax}$ ，通过通讯的方式传送给上一级电网调度系统。电网的调度系统设计一个无功补偿控制器，该无功补偿控制器包括一个带动态限幅器的调节器。限幅器的限幅值根据风电场的无功发生能力( $Q_{totalmax}$ )动态调节。电网的调度系统通过检测无功控制点处实际的无功功率，并与参考值比较，经过调节器和限幅器输出风电场无功功率参考值( $Q_{gref}$ )，由于限幅器的存在，可以保证该参考值始终在风电场的无功发生能力之内( $Q_{gref} \leq Q_{totalmax}$ )。该参考值送到风电场的监控系统，监控系统按一定规则在各个风电机组之间分配无功发生任务，即每台机组的无功功率参考值 $Q_{giref}$ 。机组的控制系统根据无功功率参考值按一定规则在定子和网侧变换器之间进行无功分配，并控制发电机组发出所需的无功功率。

## 4.2 无功功率的分配问题

### 4.2.1 各风机之间的无功分配原则

各风力发电机组间的无功功率分配原则为<sup>[15]</sup>

$$Q_{giref} = (Q_{gimax} / Q_{totalmax}) Q_{gref} \quad (26)$$

式中： $Q_{gref}$ 为无功功率补偿控制器输出的总无

功需求； $Q_{giref}$ 为第*i*台风力机无功功率的参考值。

这一原则在不超出各个风力发电机组无功功率发生极限的基础上，充分发挥了其无功发生能力。这一级分配在风电场监控系统中完成。

#### 4.2.2 定子与转子变换器之间的无功分配原则

由前面的分析，每个风力发电机组的无功功率包括定子侧的无功功率和网侧变换器的无功功率。由于定子侧的无功功率实际是通过控制转子侧来实现的，而转子侧仅需处理转差功率即可。从尽量减小功率变换器所处理的功率出发，在分配无功功率任务时应该优先考虑定子侧。

对于第*i*台风电机组的无功功率分配需考虑以下两种情况：①当无功功率参考值小于定子侧无功发生极限( $Q_{giref} < Q_{gsimax}$ )时，可以取 $Q_{gsiref} = Q_{giref}$ ，而网侧变换器工作在单位功率因数模式 $Q_{gciref} = 0$ ；②当无功功率的参考值超出了定子侧无功发生极限时( $Q_{giref} > Q_{gsimax}$ )，定子侧无功参考可以取其极限值( $Q_{gsiref} = Q_{gsimax}$ )，而网侧变换器的无功参考值则取 $Q_{gciref} = -(Q_{giref} - Q_{gsiref})$ 。这一级无功功率分配在每一台风力发电机组的控制系统中完成。

## 5 仿真研究

### 5.1 算例

以某双馈电机风场为例，不考虑风电场各台风电机组地理位置对风速的影响，认为各台风电机组吸收的风能只与机型有关。假设该风场共有10台800kW的风电机组，单台机组参数见4.2。利用第3节所提出的方法计算出的风电场无功功率动态极限，出于安全考虑，不适合直接作为系统无功功率的最大限制，而是乘一个小于1的安全系数*k*，这里*k*取0.8。

所有用户用一个等容量的感性负载等效，视在功率2720kVA，功率因数为0.75。风电场与电网简化接线图如图5所示。节点3为无功控制点。

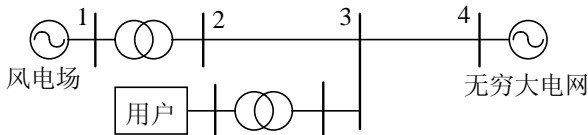


图5 风电场与地区电网简化系统接线图  
Fig. 5 Simplified circuit diagram of DFIG wind farm and its regional network

### 5.2 仿真结果

假定风电机组运行在12m/s风速下，双馈电机转速约为1100r/min；0.1s时风电场无功补偿功能启动，5s时风速逐渐增加到14m/s，双馈电机转速上升到1200r/min左右；10s时风速又下降为12m/s。仿真结果如下。

图6中，曲线1为风电场的无功功率极限( $k=0.8$ )；曲线2为风电场实际发出的无功功率；曲线3为负载的无功功率(用户)；曲线4为控制点处的无功功率。风速12m/s时，风电场的无功发生能力大于用户的无功消耗，无功补偿功能启动之后，风电场完全补偿了用户无功功率；随着风速增大到14m/s，风电场发出有功功率增加，无功功率发生能力减小，当风电场无功小于负载消耗的无功时，控制点处无功功率不能得到完全补偿；当风速又下降到12m/s后，风电场无功动态极限又恢复到原来水平，控制点处的无功功率又得到了完全补偿。

相应的风电机组定子侧和网侧变换器无功功率的情况如图7所示。可以看出在这一过程中，由于无功参考值大于定子动态无功发生极限，定子以其无功极限为参考向电网输送无功。网侧变换器在风速为12m/s时只是部分的利用了其无功发生能力；当风速为14m/s时，定子和网侧变换器为了补偿负载的无功，均充分发挥各自无功发生能力。

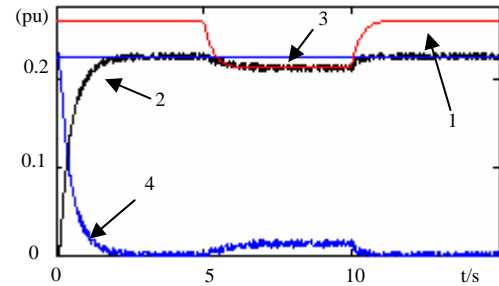
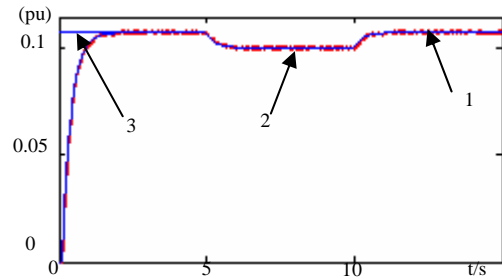
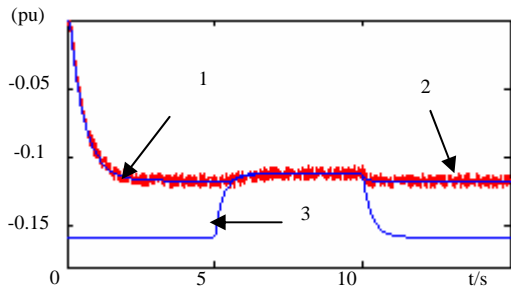


图6 系统无功补偿效果  
Fig.6 Reactive power compensation result



(a) 双馈电机定子无功功率





(b) 网侧变换器的无功功率

图7 双馈电机风电系统的无功功率

Fig. 7 Reactive power of DFIG wind power system

图8为双馈电机转差率的相应变化曲线。该双馈电机同步转速为1000r/min, 由于双馈电机在12m/s时处于超同步速的运行状态, 故转差率为负值, 随着风速的增大, 在最大风能追踪策略的控制下, 风电机组转速随之增大(低于风电机组的最大转速1300r/min), 因此转差率负值增大。

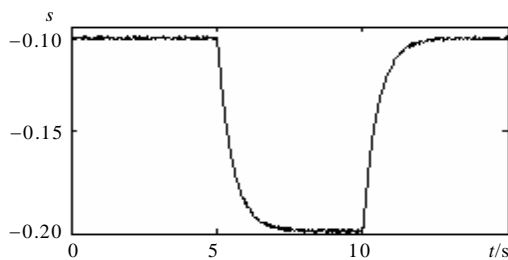


图8 双馈电机转差率

Fig. 8 Slip of DFIG

## 6 结论

从双馈电机风电机组对所连电网无功调节的贡献出发, 考虑让网侧变换器在功率允许范围之内工作在非单位功率因数模式可以提高风电系统的无功处理能力。

当双馈电机风电场所连电网为强电网时, 利用其有限的无功处理能力, 对当地用户消耗的无功进行就近无功补偿, 在实现风电机组的变速恒频优化运行的同时, 充分发挥了双馈电机风电机组和整个风电场的无功处理能力, 使其参与所连电网的无功调节, 从而可以缓解电网的无功压力。

### 参考文献

[1] 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(in Chinese).

[2] Muller S, Deicke M, De Doncker R W. Adjustable speed generations for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT

converters linked to the rotor[C]. IEEE Proceeding of IAS'00, Rome, 2000.

- [3] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11. Liu Qihui, He Yikang, Bian Songjiang. Study on the no-load cutting-in control of the variable-speed constant-frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11(in Chinese).
- [4] Hoffmann R, Mutschler P. The influence of control strategies on the energy capture of wind turbines[C]. IEEE Proceeding of IAS'00, Rome, 2000.
- [5] Datta R, Ranganathan V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2002, 17(3): 414-421.
- [6] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converter and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 1996, 143(3): 231-241.
- [7] Krzeminski Z. Sensorless multiscalar control of doubly fed machine for wind power generators[C]. The Power Conversion Conference, Osaka, 2002.
- [8] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 60-63. Shen Hong, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 60-63(in Chinese).
- [9] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] Richard P, Yuan Xiaoming, Nicholas M, et al. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines[C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [11] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125. Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [12] 宁玉泉, 李炜, 涂光瑜. 双馈电机交流励磁变速电机的稳态特性及励磁容量分析[J]. 大电机技术, 2005, 6: 24-27. Ning Yuquan, Li Wei, Tu Guangyu. Analysis of steady-state characteristic and excitation capacity for doubly fed AC excitation variable-speed induction motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2005, (6): 24-27(in Chinese).
- [13] Sergei P, Andrea T, Alerto T. Power control of a doubly fed induction machine via output feedback[J]. Control Engineering Practice, 2004, (12): 41-57.
- [14] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定

向励磁控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-162. Li Hui, Yang Shunchang, Liao Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-162(in Chinese).

[15] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29: 377-392.

[16] Chen Z. Issues of connecting wind farms into power systems[C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.

#### 作者简介

徐殿国：男，1960年10月生，博士，教授，博士生导师。研究方向为电力电子技术及应用、风力发电、照明电子技术。