

# 不对称电网电压下双馈风力发电机的控制方法

马宏伟,李永东,许烈

(清华大学电机系,北京 100084)

**摘要:**分析了不对称电网电压下双馈风力发电机的运行特性,进而提出一种基于多频点比例积分谐振控制器的矢量控制方法,通过定子侧功率的单闭环结构,实现不对称电网电压下的双馈电机控制。相比于传统的正负序双  $dq$  域控制,所提方法既不需要负序  $dq$  域控制器,也不需要转子电流内环,控制结构简单。同时,该方法只需对一个简单参数( $\lambda \in [0, 2]$ )进行调整,即可实现不对称电网电压下双馈风电系统的多种不同控制目标。基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了 1.5 MW 双馈风电仿真平台,仿真结果验证了所提算法的正确性和有效性。

**关键词:** 风电; 不对称电网电压; 双馈发电机; 比例积分谐振控制器; 控制

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.003

## 0 引言

双馈风力发电系统以其采用部分功率变换器、损耗小、造价低等优点而成为目前广泛应用的风电系统解决方案<sup>[1-5]</sup>。

然而,定子和电网直接连接的结构使得双馈风电系统对电网电压故障非常敏感。最初,电网发生故障时,双馈风电系统立即与电网解列以保护其自身硬件,但随着风电比重不断增加,电网对风电系统的运行制定了更严格的标准。紧急电网运行规程要求风电机组在电网故障时不得与系统解列,需承受暂态最大 5%、稳态最大 2% 的电网不对称电压<sup>[6]</sup>。同时,风力资源丰富的区域多集中于偏远地区,那里处于电网末端,电网网架结构薄弱,电网电压容易出现波动、不对称等异常情况,因此,双馈风电系统不对称电网下的运行控制成为了一个非常突出的问题。

根据对称分量理论<sup>[7]</sup>,不对称的电网电压将在双馈风力发电机(DFIG)中引入负序扰动分量,从而造成转子过流、功率脉动、电磁转矩脉动等一系列问题,带来电气和机械冲击。目前普遍采用的解决方案是正、负序双  $dq$  域矢量控制<sup>[8-11]</sup>,这种方法以传统矢量控制为基础,能够有效对正序和负序分量进行控制,但双 PI 环控制影响了系统的动态性能,负序控制器的加入增加了控制系统的复杂性,在工程应用中还存在着控制器校正参数较多的问题。为此,文献<sup>[12]</sup>提出一种采用多频点比例积分谐振(MFPIR)控制器控制转子电流内环的方法,省去了负序  $dq$  域控制器,但仍然采用双环结构。部分文献采用单环结构的直接功率控制(DPC)对不对称电网电压下的 DFIG 进行控制,但传统的 DPC 方法有控制精度低、

转矩脉动大、配套滤波器设计复杂等缺陷<sup>[13-14]</sup>,文献<sup>[15]</sup>对其进行了改进,但使得控制器结构更加复杂。

本文首先分析了不对称电网电压下 DFIG 的运行特性,进而提出一种基于 MFPIR 的矢量控制方法。这种方法在正序同步坐标系中对定子侧功率进行单闭环控制,不需要负序  $dq$  域控制器和转子电流内环,控制器结构简单,只需对算法中一个简单参数( $\lambda \in [0, 2]$ )进行调整,即可以以统一的控制结构实现不对称电网电压下双馈风电系统的多目标控制,调节简单,物理概念清晰。同时,本文所提出的方法也适用于双馈系统不对称低电压穿越的控制。基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了 1.5 MW 仿真系统,仿真结果验证了所提出算法的正确性和有效性。

## 1 不对称电压下 DFIG 的运行特性

### 1.1 正序同步旋转坐标系中的 DFIG 模型

图 1 为 DFIG 在正序同步旋转坐标系下的等效电路,其转子侧各量均已折算到定子侧。

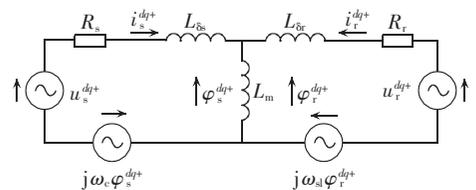


图 1 正序同步旋转坐标系中 DFIG 等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of DFIG in positive  $dq$  reference frame

图中,  $R_s$ 、 $R_r$  为定、转子电阻;  $L_{\delta s}$ 、 $L_{\delta r}$  为定、转子漏感;  $L_m$  为定转子互感;  $u_s^{dq+}$ 、 $u_r^{dq+}$  为定、转子电压;  $i_s^{dq+}$ 、 $i_r^{dq+}$  为定、转子电流;  $\varphi_s^{dq+}$ 、 $\varphi_r^{dq+}$  为定、转子磁链;  $\omega_c$  为电网同步角频率;  $\omega_{sl}$  为滑差角频率; 上标“+”表示正序同步坐标系。

此时,DFIG 的动态模型可以表述为:

$$\begin{cases} u_s^{dt} = R_s i_s^{dt} + p \varphi_s^{dt} - \omega_c \varphi_s^{qt} \\ u_s^{qt} = R_s i_s^{qt} + p \varphi_s^{qt} + \omega_c \varphi_s^{dt} \\ u_r^{dt} = R_r i_r^{dt} + p \varphi_r^{dt} - \omega_{sl} \varphi_r^{qt} \\ u_r^{qt} = R_r i_r^{qt} + p \varphi_r^{qt} + \omega_{sl} \varphi_r^{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi_s^{dt} = L_s i_s^{dt} + L_m i_r^{dt} \\ \varphi_s^{qt} = L_s i_s^{qt} + L_m i_r^{qt} \\ \varphi_r^{dt} = L_m i_s^{dt} + L_r i_r^{dt} \\ \varphi_r^{qt} = L_m i_s^{qt} + L_r i_r^{qt} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $p$  为微分算子;  $L_s$  和  $L_r$  为定、转子电感,  $L_s = L_m + L_{\delta s}$ ,  $L_r = L_m + L_{\delta r}$

DFIG 定子侧有功功率和无功功率分别为:

$$P_s = u_s^{dt} i_s^{dt} + u_s^{qt} i_s^{qt} \quad (3)$$

$$Q_s = u_s^{qt} i_s^{dt} - u_s^{dt} i_s^{qt} \quad (4)$$

DFIG 的电磁转矩为:

$$T_e = n_p (\varphi_s^{dt} i_r^{qt} - \varphi_s^{qt} i_r^{dt}) \quad (5)$$

其中,  $n_p$  为磁极对数。

## 1.2 不对称电网电压及 DFIG 运行特性

根据对称分量理论,任意三相正弦功率系统可以被解耦为 3 个独立的对称系统,即正序分量系统、负序分量系统和零序分量系统<sup>[15]</sup>。因此,不对称的电网电压可以被分解为对称的正序、负序和零序分量。在实际系统中,DFIG 通常直接与星形或三角形变压器相连,因此,电网电压的零序分量不会作用到电机上,此时只需考虑电网电压的正序和负序分量即可,其矢量关系如图 2 所示,其中,  $u_s$  为电网电压矢量,“+/-”分别表示其正序和负序分量。

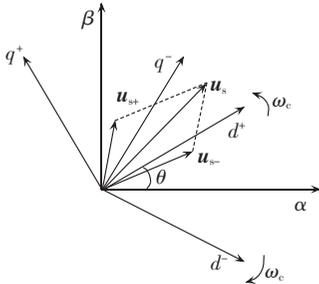


图 2 电网电压正、负序分量矢量关系

Fig.2 Positive and negative sequence components of grid voltage vector

由图 2 可知,电网电压在正序同步旋转坐标系 ( $dq^+$ ) 中可以表述为:

$$\begin{cases} u_s^{dt} = u_{s+}^{dt} + u_{s-}^{dt} \cos 2\theta + u_{s-}^{qt} \sin 2\theta \\ u_s^{qt} = u_{s+}^{qt} - u_{s-}^{dt} \sin 2\theta + u_{s-}^{dt} \cos 2\theta \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\theta = \omega_c t$ 。

根据式(1)和(2)所描述的 DFIG 模型,若此时转子变换器不能对电网电压负序分量带来的影响进行有效抑制,那么在定子电流、定子磁链、转子电流和转子磁链中均将出现负序分量,在正序同步旋转坐标系中表现为 2 倍电网基波频率的脉动。其中,双

馈电机定子侧电流可以表述为:

$$\begin{cases} i_s^{dt} = i_{s+}^{dt} + i_{s-}^{dt} \cos 2\theta + i_{s-}^{qt} \sin 2\theta \\ i_s^{qt} = i_{s+}^{qt} - i_{s-}^{dt} \sin 2\theta + i_{s-}^{dt} \cos 2\theta \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)和(7)分别代入式(3)和(4),并整理得:

$$P_s = P_{s0} + P_{s2\omega} \quad (8)$$

$$Q_s = Q_{s0} + Q_{s2\omega} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_{s0} &= u_{s+}^{dt} i_{s+}^{dt} + u_{s+}^{qt} i_{s+}^{qt} + u_{s-}^{dt} i_{s-}^{dt} + u_{s-}^{qt} i_{s-}^{qt} \\ P_{s2\omega} &= (u_{s+}^{dt} i_{s-}^{dt} + u_{s+}^{qt} i_{s-}^{qt} + u_{s-}^{dt} i_{s+}^{dt} + u_{s-}^{qt} i_{s+}^{qt}) \cos(2\omega_c t) + \\ &\quad (u_{s+}^{dt} i_{s-}^{qt} - u_{s+}^{qt} i_{s-}^{dt} - u_{s-}^{dt} i_{s+}^{qt} + u_{s-}^{qt} i_{s+}^{dt}) \sin(2\omega_c t) \end{aligned}$$

$$Q_{s0} = u_{s+}^{qt} i_{s+}^{dt} - u_{s+}^{dt} i_{s+}^{qt} + u_{s-}^{qt} i_{s-}^{dt} - u_{s-}^{dt} i_{s-}^{qt}$$

$$Q_{s2\omega} = (u_{s+}^{qt} i_{s-}^{dt} + u_{s+}^{dt} i_{s-}^{qt} + u_{s-}^{qt} i_{s+}^{dt} + u_{s-}^{dt} i_{s+}^{qt}) \cos(2\omega_c t) + \\ (u_{s+}^{qt} i_{s-}^{qt} - u_{s+}^{dt} i_{s-}^{dt} - u_{s-}^{qt} i_{s+}^{dt} + u_{s-}^{dt} i_{s+}^{qt}) \sin(2\omega_c t)$$

稳态条件下,忽略定子电阻的影响,由式(1)和(2)求得定子磁链的电网电压表达式,代入式(5)后,再结合式(6)和(7)整理得:

$$T_e = T_{e0} + T_{e2\omega} \quad (10)$$

$$T_{e0} = (u_{s-}^{dt} i_{s-}^{dt} + u_{s-}^{qt} i_{s-}^{qt} - u_{s+}^{dt} i_{s+}^{dt} - u_{s+}^{qt} i_{s+}^{qt}) n_p / \omega_c$$

$$\begin{aligned} T_{e2\omega} &= \frac{n_p}{\omega_c} [ (u_{s-}^{dt} i_{s+}^{dt} + u_{s-}^{qt} i_{s+}^{qt} - u_{s+}^{dt} i_{s-}^{dt} - u_{s+}^{qt} i_{s-}^{qt}) \cos(2\omega_c t) + \\ &\quad (u_{s+}^{qt} i_{s-}^{dt} + u_{s+}^{dt} i_{s-}^{qt} - u_{s-}^{qt} i_{s+}^{dt} - u_{s-}^{dt} i_{s+}^{qt}) \sin(2\omega_c t) ] \end{aligned}$$

由式(8)~(10)可知,在不对称电网电压条件下,DFIG 定子侧输出有功功率、无功功率和电磁转矩中均含有 2 倍电网基频的脉动分量  $P_{s2\omega}$ 、 $Q_{s2\omega}$  和  $T_{e2\omega}$ 。

## 2 基于 MFPIR 的矢量控制方法及多控制目标的实现

### 2.1 基于 MFPIR 的矢量控制方法

采用正序电网电压定向,由式(1)和(2)可得,转子变换器输出电压与电机定子电流之间的关系为:

$$\begin{cases} u_r^{dt} = A i_s^{dt} + B i_s^{qt} + C_1 \\ u_r^{qt} = A i_s^{qt} - B i_s^{dt} + C_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$A = -\frac{R_s L_r + p \sigma L_s L_r}{L_m}$$

$$B = \frac{\omega_c L_s L_r - \omega_{sl} L_m^2}{L_m}$$

$$C_1 = R_r i_r^{dt} + (\omega_c - \omega_{sl}) L_r i_r^{qt} + \frac{L_r}{L_m} u_s^{dt}$$

$$C_2 = R_r i_r^{qt} - (\omega_c - \omega_{sl}) L_r i_r^{dt} + \frac{L_r}{L_m} u_s^{qt}$$

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$$

由第 1 节分析可知,电网电压的负序分量将会在式(11)所描述的系统中引入 2 倍电网基波频率的扰动,为此,控制算法应该对这部分负序扰动进行有效的控制。

MFPIR 控制器是通过在传统 PI 控制器上并联多个谐振控制器得到的,其结构如图 3 所示。

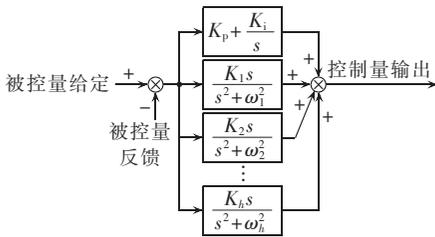


图 3 MFPIR 控制器结构图

Fig.3 Structural diagram of MFPIR controller

由图 3 可知, MFPIR 控制器的开环传递函数可以表示为:

$$G_{MFPIR} = K_p + \frac{K_i}{s} + \sum_{h=1}^n K_h \frac{s}{s^2 + \omega_h^2} \quad (12)$$

其中,  $K_p$  和  $K_i$  分别为比例系数和积分系数;  $\omega_h$  为谐振点频率,  $K_h$  为对应的谐振系数。

由 MFPIR 的波特图可知<sup>[12]</sup>, MFPIR 开环传递函数在其谐振点附近具有极高的开环增益, 能够有效地响应谐振点频率附近的扰动, 使被控量跟随给定值。本文即利用 MFPIR 控制器的这一特性, 对负序分量带来的 2 倍电网基波频率的扰动进行抑制, 结合式(3)、(4)和(11), 得到系统的控制律如式(13)和(14)所示。

$$\begin{cases} u_r^{d+} = G_{MFPIR}^{d+}(i_{s\_ref}^{d+} - i_s^{d+}) + Bi_s^{q+} + C_1 \\ u_r^{q+} = G_{MFPIR}^{q+}(i_{s\_ref}^{q+} - i_s^{q+}) - Bi_s^{d+} + C_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} i_{s\_ref}^{d+} = F^{d+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref}) \\ i_{s\_ref}^{q+} = F^{q+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F^{d+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref}) = \frac{u_s^{d+} P_{s\_ref} + u_s^{q+} Q_{s\_ref}}{(u_s^{d+})^2 + (u_s^{q+})^2} \\ F^{q+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref}) = \frac{u_s^{q+} P_{s\_ref} - u_s^{d+} Q_{s\_ref}}{(u_s^{d+})^2 + (u_s^{q+})^2} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $G_{MFPIR}^{d+}$  和  $G_{MFPIR}^{q+}$  分别为正序同步坐标系下  $d$  轴和  $q$  轴的 MFPIR 控制器开环传递函数;  $F^{d+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref})$  和  $F^{q+}(P_{s\_ref}, Q_{s\_ref})$  分别为由定子侧功率参考值获得的定子侧  $d$  轴和  $q$  轴电流参考值的函数。

由第 1 节分析可知, 电网电压负序分量将在系统中引入 2 倍电网基波频率的扰动, 这个扰动在电网不对称故障的过程中将持续存在。而由文献[16]知, 由于磁链不能突变, 电网电压跌落瞬间将在系统中引入同步电网频率的扰动, 这个扰动将逐渐衰减。为使本文方法也能够适用于不对称低电压穿越过程, 在正序同步坐标系下 MFPIR 控制器的设计中, 分别于 1 倍和 2 倍电网频率处设置 2 个谐振点, 即:

$$n=2, \omega_1=\omega_c, \omega_2=2\omega_c$$

其中, 前一个谐振点用于抑制电压幅值跌落瞬间引入的暂态扰动, 后一个谐振点用于抑制负序电压分量引入的持续扰动。

在双馈风力发电系统中, 定子电压是由电压传感器测量得到的信号, 并且完全由电网电压情况决定,

而非风电系统中的可控量。由式(3)和(4)可知, 对定子侧电流的闭环控制就可以被视为对定子功率的闭环控制, 因此, 式(13)和(14)给出的控制方法被称为基于 MFPIR 的定子侧功率单闭环矢量控制, 其控制框图如图 4 所示。

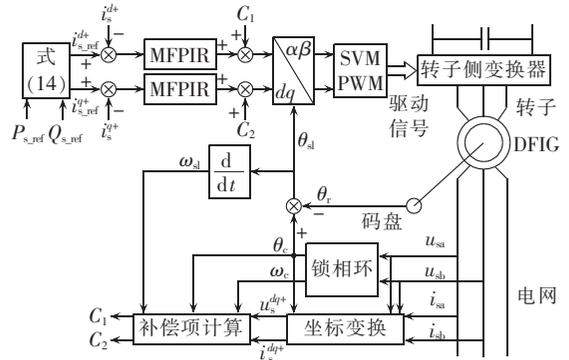


图 4 基于 MFPIR 的定子侧功率单闭环矢量控制框图

Fig.4 Block diagram of MFPIR-based single-loop vector control of stator-side power

## 2.2 多种控制目标的实现

在正常电网电压条件下, 传统控制策略的主要控制目标是保持电机定子注入到电网中的功率保持恒定, 但是, 在不对称电网电压下, 由于负序分量的影响, DFIG 的控制目标将不再单一, 根据目前已有文献<sup>[14-15, 17]</sup>, 其控制目标可整理概况为:

- I. 定子侧有功和无功功率稳定;
- II. 电磁转矩和定子无功功率稳定;
- III. 定子电流波形正弦且对称;
- IV. 上述控制目标之间的折中目标。

不同的控制目标具有不同的系统特性, 控制目标 I 关注系统注入电网功率的平稳; 控制目标 II 关注减少系统叶轮和齿轮箱的机械冲击; 控制目标 III 关注注入电网电流的质量; 控制目标 IV 为系统带来更大的灵活性, 使得系统可以应对各种不同工况和要求。

目前已有文献多是针对前 3 种控制目标中的一种进行设计, 或采用不同控制结构实现前 3 种控制目标中的几种。本文提出的方法只需对一个简单参数 ( $\lambda \in [0, 2]$ ) 进行调整, 即可以以统一的结构实现上述 4 种控制目标, 其分析和推导过程如下。

整理式(8)和(9), 合并其中定子电流的正、负序分量, 则电机定子侧有功和无功功率可以重新表述为:

$$P_s = P_{s+} + P_{s-} \quad (16)$$

$$Q_s = Q_{s+} + Q_{s-} \quad (17)$$

$$P_{s+} = u_{s+}^{d+} i_{s+}^{d+} + u_{s+}^{q+} i_{s+}^{q+}$$

$$P_{s-} = u_{s-}^{d-} i_{s-}^{d-} \cos(2\omega_c t) + u_{s-}^{q-} i_{s-}^{q-} \sin(2\omega_c t) + u_{s-}^{q-} i_{s-}^{q+} \cos(2\omega_c t) - u_{s-}^{d-} i_{s-}^{d+} \sin(2\omega_c t)$$

$$Q_{s+} = u_{s+}^{q+} i_{s+}^{d+} - u_{s+}^{d+} i_{s+}^{q+}$$

$$Q_{s-} = u_{s-}^{q-} i_{s-}^{d-} \cos(2\omega_c t) - u_{s-}^{d-} i_{s-}^{q-} \sin(2\omega_c t) -$$

$$u_{s-}^{q+} i_{s-}^{d+} \cos(2\omega_c t) - u_{s-}^{d+} i_{s-}^{q+} \sin(2\omega_c t)$$

已知 DFIG 电磁功率可以表示为:

$$P_{Te} = \frac{T_e \omega_c}{n_p} \quad (18)$$

将式(10)代入式(18),并合并其中定子电流正、负序分量,则有:

$$P_{Te} = P_{s+} - P_{s-} \quad (19)$$

由式(16)、(17)和(19)可知:

a. 当  $P_s$  和  $Q_s$  被控制为定值时,定子侧功率无脉动,但  $i_{s+}^{dq+}$  和  $P_{Te} = P_{s+} - P_{s-}$  将不是定值,即定子电流非正弦对称,且转矩出现脉动;

b. 当  $P_{Te}$  和  $Q_s$  被控制为定值时,电磁转矩和定子侧无功无脉动,但  $i_{s+}^{dq+}$  和  $P_s$  将出现脉动,即定子电流非正弦对称,且定子有功出现脉动;

c. 当  $P_{s+}$  和  $Q_{s+}$  被控制为定值时,  $i_{s+}^{dq+}$  为定值,定子电流呈现正弦对称性,但  $P_s$ 、 $Q_s$  和  $P_{Te}$  将出现脉动,即定子功率和转矩将出现脉动;

d. 上述 3 种情况不能同时获得,同一时刻只能实现其中之一。

综上,可以通过控制定子侧功率中各个分量的不同值而获得不同的控制目标。在定子侧功率可以有效控制的情况下,本文通过引入如式(20)所示的前馈分量来实现上述 3 种控制目标。

$$\begin{cases} P_{\text{feedforward}} = \lambda \hat{P}_{s-} \\ Q_{\text{feedforward}} = (1 - |\lambda - 1|) \hat{Q}_{s-} \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $\lambda \in [0, 2]$ ,  $\hat{P}_{s-}$  和  $\hat{Q}_{s-}$  为根据式(16)和(17)计算的当前采样周期的  $P_{s-}$  和  $Q_{s-}$  估算值,此时系统控制框图如图 5 所示。

参数  $\lambda$  的意义如下:

a.  $\lambda = 0$  时,通过闭环结构,  $P_s$  和  $Q_s$  被控制为定值,即定子侧有功和无功功率无脉动,实现控制目标 I;

b.  $\lambda = 1$  时,通过闭环结构,  $P_{s+}$  和  $Q_{s+}$  被控制为定值,即定子侧电流正弦对称,实现控制目标 III;

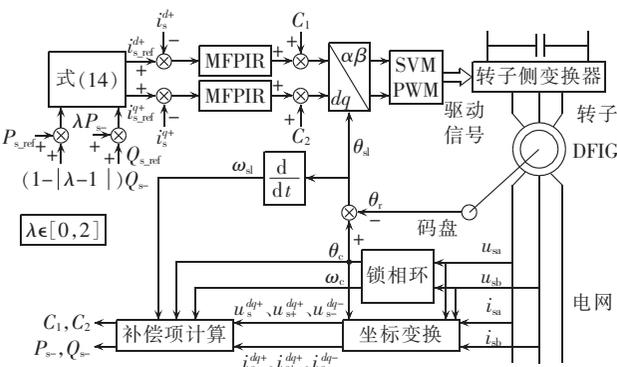


图 5 基于 MFPIR 的多目标系统控制框图

Fig.5 Block diagram of MFPIR-based multi-objective control

c.  $\lambda = 2$  时,通过闭环结构,  $P_{Te}$  和  $Q_s$  被控制为定值,即电磁转矩和定子侧无功功率无脉动,实现控制目标 II;

d.  $\lambda$  为其他值时,系统控制目标将在 I—III 之间协调折中,即实现控制目标 IV。

### 3 仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 环境,搭建 1.5 MW 双馈风力发电系统的仿真平台,其中 DFIG 系统及仿真相关参数如下:额定功率 1.5 MW,额定电压 690 V,额定电流 1050 A,极对数 2,定子电阻 0.0056  $\Omega$ ,转子电阻 0.0063  $\Omega$ ,定子漏感 0.3 mH,转子漏感 0.5 mH,定转子互感 4.6 mH,定转子匝数比 0.4829。直流母线电压 1100 V,变换器开关频率 2 kHz。在不同电网电压和  $\lambda$  取值条件下,系统的仿真结果如图 6—8 所示。注意,本文采用不对称度(AF)来表征电网电压或电流的不对称程度,其定义为负序分量占正序分量的比例<sup>[18]</sup>。

图 6 为不对称电网电压下双馈风电系统各种控制目标相互切换的动态过程。可见,通过简单地修改  $\lambda$  参数,系统能够在多个控制目标间实现实时切换,满足不同工况、不同用户的要求,且切换过程平滑,动态响应迅速。

图 7 为各种不对称电压条件下,各种  $\lambda$  参数设定与系统稳态特性的关系图。由图可知,当控制目标分别被设置为有功和无功功率稳定( $\lambda = 0$ )、定子电流正弦且对称( $\lambda = 1$ )、电磁转矩和无功功率稳定( $\lambda = 2$ )时,控制目标量中的脉动被有效抑制,其控制效果和理想电网条件下近乎一致,而此时,非控制目标量的脉动将会较大。由图中亦可看出,控制目标 I、II 和 III 彼此相互排斥,不可同时获得,但是通过调节  $\lambda$  的数值,可在不同控制目标之间取得一种折中,即控制目标 IV。

图 8 为定子电流的谐波分析。可以看到,当  $\lambda < 1$  时,各种不同工况下,定子电流的 THD 随  $\lambda$  增加而减小,即定子电流波形愈发趋向正弦;当  $\lambda > 1$  时,定子电流的 THD 都较低,且和理想电网条件下定子电流的控制效果非常接近,这表明此时定子电流的正弦度已经非常高,但随着  $\lambda$  的取值增加,定子电流的三相不对称度逐渐增加(见图 6 和图 7)。由此可知,电流的负序分量在时域波形上表现在 2 个方面,即波形的正弦度和波形的对称度,且当  $\lambda = 1$  时,定子电流负序分量最低,波形质量达到最优。

本文提出的方法也能够用于 DFIG 的不对称低电压穿越控制,图 9 为电网电压发生 500 ms 不对称电压跌落(AF = 20%)时的低电压穿越过程。可见,

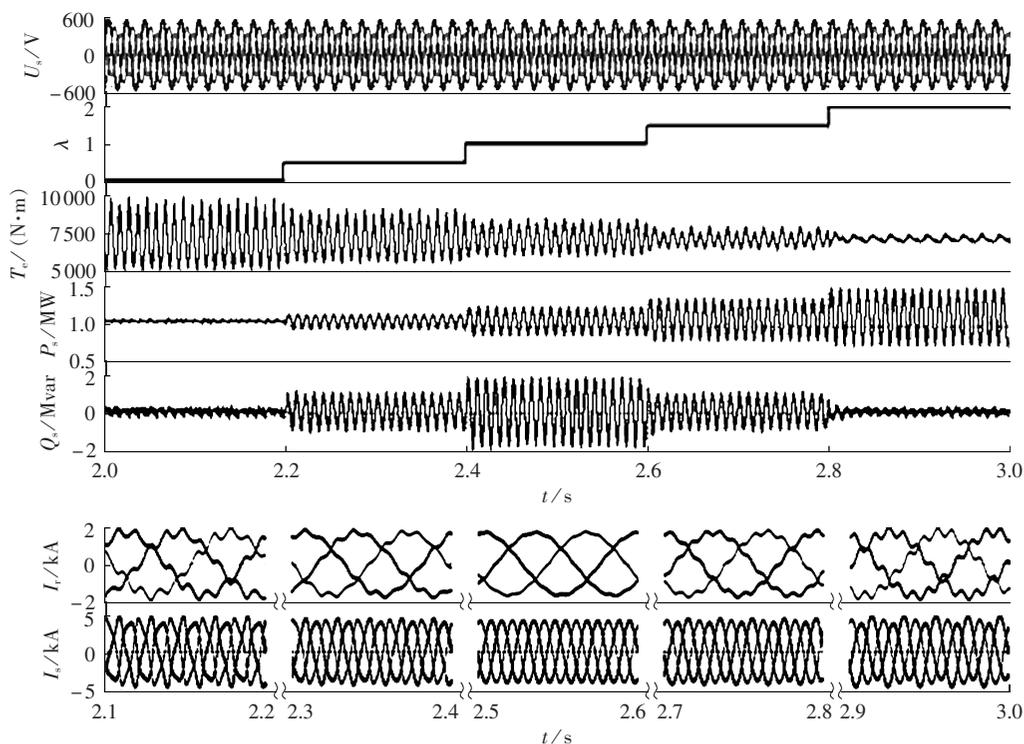


图 6 多目标控制的动态特性(电网电压不对称度 15%)

Fig.6 Dynamic behavior of multi-objective control(asymmetrical factor is 15%)

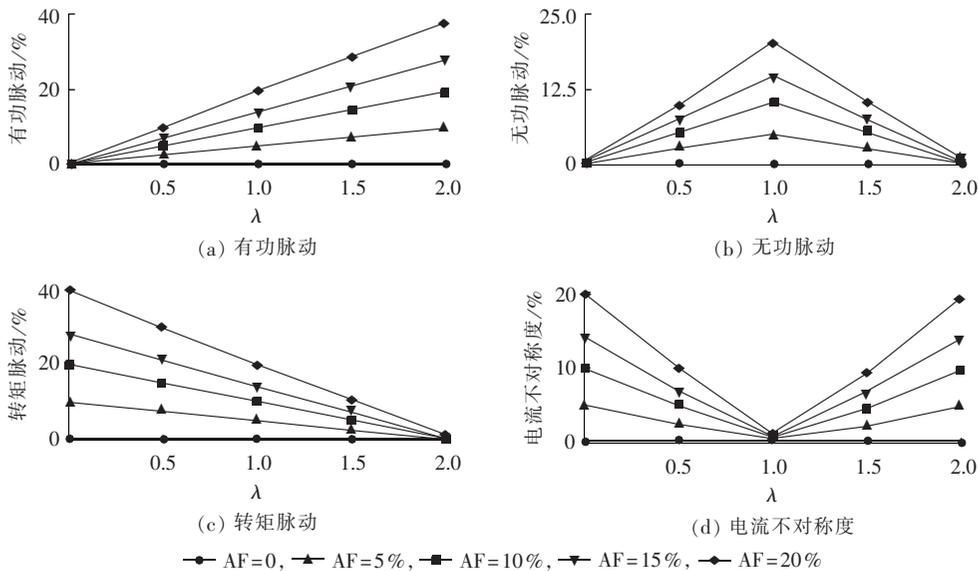


图 7 系统在各种工况和  $\lambda$  参数下的稳态特性

Fig.7 Steady-state behavior of system under different grid voltage conditions and  $\lambda$  values

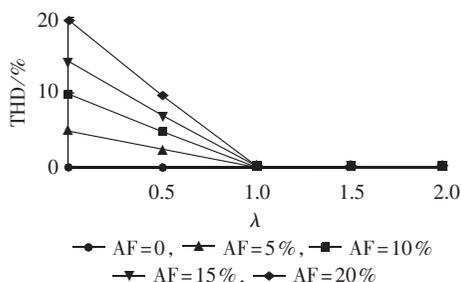


图 8 定子电流 THD 分析

Fig.8 THD analysis of stator current

在电网电压故障发生 75 ms 之后,有功功率降额输出,并向电网注入无功 400 kvar 以支撑电网;在电网电压恢复 75 ms 之后,系统恢复有功功率输出,并实现单位功率因数。整个低电压过程中,双馈风力发电系统与电网保持连接,并为电网提供无功支撑,有效实现低电压穿越。

综上,本文提出的方法能够实现不对称电网电压下 DFIG 的有效控制,结构简单,控制目标切换灵活,过渡过程平滑。

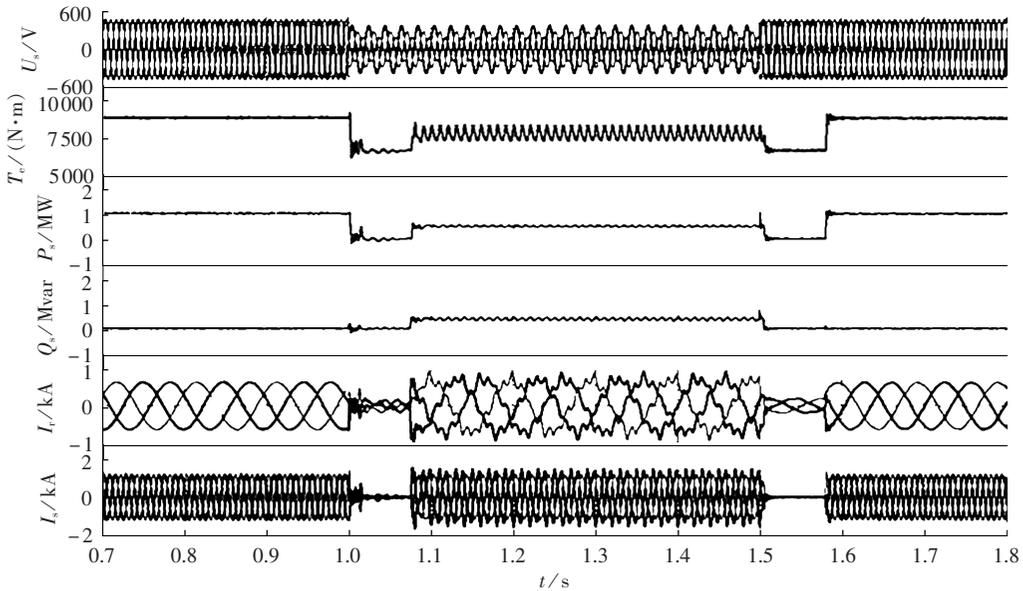


图 9 所提方法用于不对称低电压穿越控制的仿真结果(电网电压不对称度 20%, $\lambda=0$ )

Fig.9 Simulative results of asymmetrical low-voltage ride-through control by proposed method(asymmetrical factor is 20% and  $\lambda$  is 0)

## 4 结论

本文针对不对称电网电压下的 DFIG,提出了一种基于 MFPIR 控制器的矢量控制方法,它通过单闭环结构在正序同步旋转坐标系中对定子侧功率进行控制,相比于传统 PI 控制方法,不需要对电机模型进行负序分离,也不需要负序  $dq$  域下的 PI 控制器和转子电流内环,控制结构简单,动态响应好。通过对一个简单参数( $\lambda \in [0, 2]$ )的调整,实现多种不同控制目标,适应不同工况和系统需求,各控制目标间可以实时在线切换,其动态响应迅速,切换过程平滑。仿真结果表明,本文所提出的方法不但适用于不对称电网电压条件下 DFIG 的控制,也适用于双馈风电系统不对称低电压穿越的过程,是 DFIG 的一种有效控制方法,应用前景广泛。

## 参考文献:

[1] TAZIL M, KUMAR V, BANSAL R C, et al. Three-phase double fed induction generators: an overview [J]. IET Electric Power Application, 2010, 4(2): 75-89.

[2] HU J, NIAN H, HU B, et al. Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1028-1039.

[3] 张永斌, 袁海文. 双馈风电机组低电压穿越主控系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 106-112.  
ZHANG Yongbin, YUAN Haiwen. Control strategy of DFIG main control system during low voltage ride through [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 106-112.

[4] 朱颖, 李建林, 赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 20-24.  
ZHU Ying, LI Jianlin, ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 20-24.

[5] 陈思哲, 章云, 吴捷, 等. 双馈风力发电系统的比例谐振直接电压控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 104-113.  
CHEN Sizhe, ZHANG Yun, WU Jie, et al. Proportional-resonant direct voltage control of DFIG wind power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 104-113.

[6] National Grid Company. Appendix 1: extracts from the grid code connection conditions [G/OL]. [2008-01-01]. <http://www.nationalgrid.com>.

[7] PAAP G C. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.

[8] PENA R, CARDENAS R. Control system for unbalanced operation of stand-alone doubly fed induction generators [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 544-545.

[9] GOMIS-BELLMUNT O, JUNYET-FERRE A, BERGAS-JANE J. Riding-through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(4): 1036-1045.

[10] CHONG H N, LI R, BUMBY J. Unbalanced-grid-fault ride-through control for a wind turbine inverter [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2008, 44(3): 845-856.

[11] XU L, WANG Y. Dynamic modelling and control of DFIG-based wind turbine under unbalanced network conditions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 314-323.

[12] KEARNEY J, CONLON M F, COYLE E. The application of multi frequency resonant controllers in a DFIG to improve performance by reducing unwanted power and torque pulsations and reducing current harmonics [C] // 45th International Universities' Power Engineering Conference. Cardiff, Wales, UK: IEEE, 2010: 1-6.

[13] ABAD G, RODRIGUEZ M A, IWANSKI G, et al. Direct power control of DFIG-based wind turbine under unbalanced grid voltage [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(2): 442-452.

[14] SANTOS-MARTIN D, RODRIGUEZ-AMENEDO J L. Direct power control applied to doubly fed induction generator under unba-

- lanced grid voltage conditions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(5): 2328-2336.
- [15] SANTOS-MARTIN D, RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTES S. Providing ride-through capability to a doubly fed induction generator under unbalanced voltage dips [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1747-1756.
- [16] LOPEZ J, GUBIA E, SANCHIS P, et al. Wind turbine based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-329.
- [17] 郭晓明, 贺益康, 何奔腾, 等. 不对称电网电压下双馈风力发电机的直接功率控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 86-91.
- GUO Xiaoming, HE Yikang, HE Benteng, et al. Direct power control on the DFIG wind turbine under unbalanced grid voltage conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 86-91.
- [18] BREKKEN T K A, MOHAN N. Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 129-135.

#### 作者简介:

马宏伟(1982-), 男, 黑龙江五常人, 博士研究生, 主要从事电力电子与新能源发电技术的研究(E-mail: mhw08@mails.tsinghua.edu.cn);

李永东(1962-), 男, 河北霸州人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事大容量电力电子变换器和高性能电机控制领域的研究(E-mail: liyd@mail.tsinghua.edu.cn);

许烈(1981-), 男, 北京人, 研究员, 博士, 主要从事矩阵变换器和新能源技术的研究(E-mail: xulie@mail.tsinghua.edu.cn)。

## Control strategy of DFIG under unbalanced grid voltage condition

MA Hongwei, LI Yongdong, XU Lie

(School of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The behavior of DFIG (Doubly-Fed Induction wind Generator) under unbalanced grid voltage condition is analyzed and a vector control method based on multi-frequency proportional integral resonant controller is proposed, which applies the single close-loop structure of stator-side power to realize the control of DFIG. Compared with the traditional dual  $dq$ -domain control, its control structure is simple, without the PI controller in negative  $dq$  domain and the inner loop of rotor current. The multiple control objectives are achieved by conveniently adjusting the only parameter ( $\lambda \in [0, 2]$ ). A 1.5 MW DFIG-based wind power system is built with MATLAB/Simulink and the simulative results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** wind power; unbalanced grid voltage; doubly-fed induction generator; proportional integral resonant controller; control

(上接第 11 页 continued from page 11)

## Power system self-organized criticality recognition based on assortativity

CAO Yijia<sup>1,2</sup>, ZHANG Yudong<sup>1</sup>, LIN Hui<sup>3</sup>, HAN Haojiang<sup>3</sup>, BAO Zhejing<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The concept of assortativity in complex system theory is introduced to match the line load rate with the line vulnerability and an index named line assortativity is proposed to quantify the distribution characteristic of line power flow, which is then used to identify the self-organized criticality of power system. Simulative results indicate that, combined with the average load rate and the power flow entropy, it identifies the self-organized criticality of power system effectively when multiple systems operate in different conditions, even when the mean system load rate is lower, which is an important complement to the existing indices for mitigating the large blackouts.

**Key words:** electric power systems; self-organized criticality; assortativity; cascading failures; vulnerability; power flow entropy