

# 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护

郭家虎<sup>1,2</sup>, 张鲁华<sup>2</sup>, 蔡旭<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 上海交通大学风力发电研究中心, 上海 200240)

**摘要:** 为了研究双馈感应风力发电机组的低电压穿越以及故障保护技术, 根据双馈风力发电系统的数学模型采用数学解析的方法详细地分析了双馈感应发电机和变换器在三相电网短路故障时的动态响应特性; 推导出了三相电网短路故障时双馈发电机的故障电流最大值及其发生时刻; 并在此基础上, 研究了双馈风力发电机的转子保护电路的具体设计方法及计算依据。

**关键词:** 风力发电; 双馈发电机; 三相短路; 低压穿越; 转子保护

## Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid

GUO Jia-hu<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu-hua<sup>2</sup>, CAI Xu<sup>2</sup>

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** To research the technology of grid fault ride-through and protection of doubly-fed induction generator(DFIG), the responses of DFIG and converter in the case of grid fault are analyzed in detail. First, the simple space vector models are presented to estimate the moduli of DFIG stator voltage under grid fault. Then, the response of DFIG and converter in grid fault is developed in detail, and the maximum value of the short-current of DFIG is determined. At last, the method on crowbar design is proposed.

**Key words:** wind power; DFIG; three-phase short circuit; low voltage ride through; rotor protection

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0040-05

## 0 引言

随着风力发电的快速发展, 风电场的规模和单机容量不断增大, 对并网型风电机组的运行要求也日益严格。双馈风力发电机组是目前应用最广泛的风电机组, 它的发电机采用绕线式异步感应发电机, 其定子直接与电网相连, 而转子则通过交直交变换器与电网相连, 对电网的敏感性较强, 而且由于双馈电机定子电压方程本身具有欠阻尼特性, 所以当电网出现故障等运行状态变化, 尤其是电网出现三相短路故障时, 会造成发电机定转子电流突然增大, 甚至造成双馈发电机和变频器过电流或过电压。为了保护发电机和变频器, 以及满足电网规则对于风电机组的低电压穿越要求, 一般采用带 CROWBAR 的转子保护电路来实现双馈型风力发电机组低电压状态下的运行<sup>[1-2]</sup>。

目前已经有很多文献讨论了双馈风力发电机

电网故障下的动态响应和转子电路保护问题, 但大多数都是利用仿真工具使用图解的方式来进行分析, 缺乏详细的理论分析和定量研究, 没有给出转子保护电路(CROWBAR)的具体设计方法, 对双馈风力发电机组故障时的保护和控制, 没有具体的指导作用<sup>[3-6]</sup>; 而且其分析多是集中在双馈感应发电机本身, 没有分析和考虑在电网电压跌落时变频器的响应特性以及它和双馈发电机之间的相互影响<sup>[7-9]</sup>。

本文采用数学解析方法对双馈发电机及变频器在电网三相短路故障下的动态响应问题进行了详细地定性和定量分析, 推导出了电网三相短路故障时双馈发电机的故障电流最大值及其发生时刻; 并在此基础上, 提出了双馈风力发电机的转子保护电路的具体设计方法及计算依据, 最后进行了仿真验证。

## 1 双馈风力发电系统的控制模型

通过图1所示的双馈风力发电系统的等效电路图可以建立起以空间矢量形式表示的数学模型<sup>[10]</sup>:

**基金项目:** 安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2007B006); 上海市科委项目(08DZ1200504)

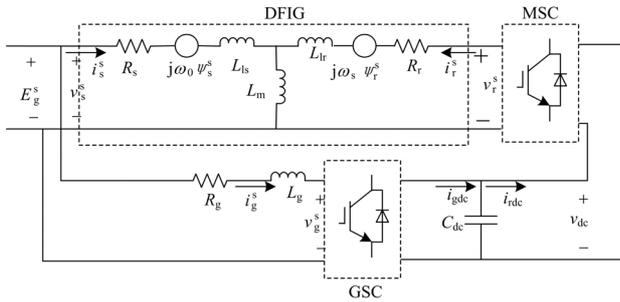


图1 双馈风力发电系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of the DFIG system

$$v_s = R_s i_s + j\omega_0 \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$v_r = R_r i_r + j\omega_s \psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (2)$$

$$v_g = E_g - R_g i_g - j\omega_g L_g i_g - L_g \frac{di_g}{dt} \quad (3)$$

$$C_{dc} v_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc} = P_g - P_r \quad (4)$$

其中:

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (5)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (6)$$

式中:  $v_s$ ,  $v_r$ ,  $i_s$ ,  $i_r$ ,  $v_s$ ,  $\psi_s$ ,  $\psi_r$  为双馈发电机定子和转子的电压, 电流及磁链;  $E_g$  为电网电压,  $v_s = E_g$ ;  $v_g$ ,  $i_g$  为网侧变换器电压和电流;  $v_{dc}$  为直流侧电压;  $C_{dc}$  为直流侧电容;  $P_g$ ,  $P_r$  分别为网侧变换器和转子侧变换器输入功率;  $L_m$ ,  $L_s$  和  $L_r$  为等效的励磁电感, 定子电感和转子电感;  $\omega_g = \omega_0$ ,  $\omega_r$ ,  $\omega_s$  分别为电网角频率, 双馈发电机定子电压角频率, 转子角频率以及转差角频率。

网侧变换器通常采用电网电压定向的矢量控制方法来保持单位功率因数下的直流侧电压稳定, 而转子侧变换器在忽略定子电阻的条件下, 采用定子磁链定向的矢量控制方法进行有功功率和无功功率的解耦控制<sup>[11]</sup>。这时稳态运行的定子、转子磁链可表示为

$$\psi_{s0} = \frac{E_g}{\omega_0} \quad (7)$$

$$\psi_r = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_r + \frac{L_m}{L_s} \psi_s \quad (8)$$

根据双馈发电机的磁链公式(5)、(6)可得双馈发电机的定子和转子电流分别为

$$i_s = \frac{1}{L_s'} \psi_s - \frac{L_m}{L_r L_s'} \psi_r \quad (9)$$

$$i_r = -\frac{L_m}{L_s} \frac{1}{L_r'} \psi_s + \frac{1}{L_r'} \psi_r \quad (10)$$

其中:

$$L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = L_{s\delta} + \frac{L_{r\delta} L_m}{L_{r\delta} + L_m} \quad (11)$$

$$L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} = L_{r\delta} + \frac{L_{s\delta} L_m}{L_{s\delta} + L_m} \quad (12)$$

式中:  $L_{s\delta}$  和  $L_{r\delta}$  分别为双馈发电机定转子漏抗。

忽略转子电流的瞬间动态变化, 同时考虑到  $L_{s\delta} \ll L_m$ , 则转子电流和网侧电流分别可表示为:

$$v_r \approx v_s - j\omega_r \psi_s = jE_g - j\omega_r \psi_s \quad (13)$$

$$i_{gq} = -(E_{gq} i_{rq} - \psi_{s0} i_{rq} \omega_r) / E_{gq} \approx -(1 - \omega_r / \omega_0) i_{rq} \quad (14)$$

进一步可得到转子侧变换器  $P_r$  和网侧变换器的功率  $P_g$  为

$$P_r = \text{Re}[3v_r i_r^*] \approx 3E_{gq} i_{rq} - 3\psi_{s0} i_{rq} \omega_r \quad (15)$$

$$P_g = \text{Re}[3v_g i_g^*] \approx 3E_{gq} i_{gq} \quad (16)$$

直流母线电压可表示为

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc}^2 = P_g - P_r = 0 \quad (17)$$

即双馈风力发电系统处于稳定状态时, 有  $P_r = P_g$ , 直流母线电压为恒值。

## 2 电压跌落时双馈发电机的动态特性

在电网正常运行时, 双馈风力发电机组的机端电压在定子磁链定向的同步旋转坐标系下表示为

$$E_g = jE_g \quad (18)$$

当电网发生三相对称短路故障时, 双馈风力发电系统的三相机端电压的有效值会出现相同程度的减小, 同时其相角也会发生变化, 假设锁相环设计良好, 可以完全跟踪上机端电压的变化, 则此时由于电网电压跌落而引起的相角变化就可以忽略不计, 则机端电压矢量就可表示为:

$$E_{SAG} = jV \quad (19)$$

其中:  $V$  是电网故障后, 发电机定子仍然保持的电压幅值, 它反映了电网故障的严重程度以及故障点与双馈风力发电机组的距离远近。最严重的情况是发电机定子端直接对地短路, 此时  $V=0$ 。

双馈发电机定子电压的跌落会引起发电机内部一系统的变化, 其中最重要的就是发电机定子磁链的变化, 理解故障时定子磁链的变化规律是分析双馈发电机在电网电压跌落时的暂态关系的关键。

假设电网在  $t=t_0$  时刻发生故障, 将此时如式

(19) 所示的双馈发电机定子端电压代入到定子电压方程 (1) 中, 可得

$$jV = R_s i_s + j\omega_0 \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (20)$$

可以看出, 该微分方程是一个非齐次微分方程, 它的解有特解和通解两部分构成, 其中特解是电网故障后的稳态定子磁链, 它与外施激励即定子电压有关, 又称强制分量。齐次方程的通解是电网故障期间双馈发电机定子磁链从原来的稳定状态转变到另一个新的稳定状态的瞬态分量, 有时也称之为自由分量, 它与双馈发电机的结构和参数有关, 按指数规律衰减, 最终趋于零, 衰减时间常数为

$$T_s' = \frac{L_s'}{R_s} \quad (21)$$

在忽略定子电阻的条件下, 有

$$jV \approx \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_0 \psi_s \quad (22)$$

$$\psi_s(t_0) = \psi_{s0} \quad (23)$$

求解该微分方程可得:

$$\psi_{st} = \frac{V}{E_g} \psi_{s0} + (1 - \frac{V}{E_g}) \psi_{s0} e^{-j\omega_0 t} \quad (24)$$

上面的定子磁链是在忽略双馈发电机的定子电阻的条件下得到的, 在这个条件下得到的定子磁链是不衰减的, 而实际上由于定子电阻的存在, 定子磁链的暂态分量是以时间常数  $T_s'$  衰减变化的, 于是电网电压跌落时的双馈发电机的定子磁链变为:

$$\psi_{st} = \frac{V}{E_g} \psi_{s0} + (1 - \frac{V}{E_g}) \psi_{s0} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s'}} \quad (25)$$

从式(25)可以看出, 在电网发生三相对称短路故障时, 双馈发电机的定子磁链由机端电压跌落后的稳态定子磁链和由于机端电压跌落而所形成的暂态分量两部分组成, 在同步旋转坐标系下, 暂态分量以频率  $\omega_0$  衰减振荡, 振荡幅值为  $(1 - V/E_g) \psi_{s0}$ , 与电机端电压跌落程度有关。

根据式 (13) 可求得双馈风力发电机的转子电压

$$v_r \approx jV(1 - \frac{\omega_r}{\omega_0}) - j(\frac{E_g - V}{\omega_0}) \omega_r e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s'}} \quad (26)$$

可以看出, 机端电压跌落时, 双馈发电机的转子电压会出现和定子磁链相类似的振荡, 振荡频率为  $\omega_0$ , 振荡幅值与电压跌落的幅值以及发生故障时双馈发电机的转速有关, 电网跌落的程度越深, 转子速度越快, 转子电压的振荡幅值就越大。如果电

网出现相同的故障, 则双馈风力发电机工作在超同步状态时比在亚同步状态时的转子电压变化会更大, 更容易造成电机转子过电压。

假定稳态条件优先于电压跌落, 则在变换器的控制作用下, 转子电流和电流值 (最起码接近) 为所期望的参考值, 则在电压跌落后, 转子侧功率  $P_r$  和网侧功率  $P_g$  分别为

$$P_r(t) \approx 3V(1 - \frac{\omega_r}{\omega_0}) i_{rq} - 3(1 - \frac{V}{E_g}) \psi_{s0} i_{rq} \omega_r e^{-\frac{t}{T_s'}} e^{-j\omega_0 t} \quad (27)$$

$$P_g(t) \approx 3v_{i_{gq}} \approx -3V(1 - \frac{\omega_r}{\omega_0}) i_{rq} \quad (28)$$

根据直流母线电压平衡公式有

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc}^2 = -P_g - P_r = \quad (29)$$

$$3(1 - \frac{V}{E_g}) \psi_{s0} i_{rq} \omega_r e^{-\frac{t}{T_s'}} e^{-j\omega_0 t}$$

由式(29)可见, 当电网发生电压跌落时, 转子侧变换器和网侧变换器之间的功率就不再相等, 式(27)的第一项的功率跌落可以由式(28)中相同的功率跌落来补偿, 而式(27)的第二项就成为直流侧的一个扰动

$$D = 3(1 - \frac{V}{E_g}) \psi_{s0} i_{rq} \omega_r e^{-\frac{t}{T_s'}} e^{-j\omega_0 t} \quad (30)$$

在以电网电压定向的矢量控制策略下, 网侧变换直流侧电压的静态增益可近似表示为<sup>[14]</sup>

$$|G_{pedc}(j\omega_g)| = \frac{2}{C_{dc} \omega_0} \quad (31)$$

于是可以求得直流侧电压的纹波幅值为

$$e_{dc} = 6 \frac{(E_g - V) \omega_r}{C_{dc} E_g \omega_0} \psi_{s0} i_r e^{-\frac{t}{T_s'}} e^{-j\omega_0 t} \quad (32)$$

可见, 在电网电压出现对称故障时, 会造成转子侧变换器和网侧变换器之间的功率失衡, 导致双馈风力发电系统的直流母线电压会出现衰减振荡的纹波, 其振荡频率为  $\omega_0$ , 其幅值如式 (32) 所示。

### 3 双馈发电机的最大故障电流

从前面的分析中我们知道, 无论是转子电压还是直流母线电压, 它们的振荡程度都是和双馈发电机的定子电压的跌落程度密切相关的。当双馈发电机的定子电压降为零, 即三相短路故障发生在发电机定子侧时, 情况最为严重, 对系统的危害也最大。

当双馈感应发电机定子端直接短路时, 其定子

端电压降低为 0, 即  $V=0$ , 则其定子磁链变为

$$\psi_{st} = \psi_{s0} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} = \frac{E_g}{\omega_0} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (33)$$

和求解定子磁链的方法一样, 根据(2)可以解出转子磁链为

$$\psi_{rt} = \psi_{r0} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} = \frac{L_m E_g}{L_s \omega_0} e^{-j\omega_0 t} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} \quad (34)$$

将(33)和(34)代入到(10), 可得发电机定子直接短路时, 双馈发电机的定、转子电流分别为

$$i_s = \frac{E_g}{\omega_0 L_s} (e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{L_m}{L_s L_r} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}}) \quad (35)$$

$$i_r = \frac{E_g L_m}{\omega_0 L_r L_s} (e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} - e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}}) \quad (36)$$

在故障发生前, 转差频率较小, 定、转子磁链在幅值和相位上近似相等, 故障发生后, 定子磁链固定在定子上不动, 但是转子磁链将随着转子的转动而转动, 故障发生后大约半个周期 ( $t=T/2=\pi/\omega_0$ ) 时, 转子磁链将与定子磁链之间相差  $\pi$  角度, 处在相反的位置上, 这时候定、转子电流出现最大值, 在固定轴坐标系下可近似表示为:

$$i_{s\max} = \frac{E_g}{\omega_0 L_s} (e^{-\frac{T}{2T_s}} + \frac{L_m}{L_s L_r} e^{-\frac{T}{2T_r}}) \quad (37)$$

$$i_{r\max} = -\frac{E_g L_m}{\omega_0 L_r L_s} (e^{-\frac{T}{2T_r}} + e^{-\frac{T}{2T_s}}) \quad (38)$$

## 4 双馈风力发电机组的保护

### 4.1 转子保护电阻的设计

根据前面的分析和推导, 我们可以准确地理解双馈发电系统在电网三相短路故障时的暂态物理过程: 电网电压的跌落将引起发电机定子电压突变从而使定子磁链出现衰减振荡的暂态分量, 进一步会引起双馈发电机的定子和连接有变换器的转子出现较大的振荡电流, 这时就需要变换器能够输出很高的电压来控制住电流, 当所需要的电压值超过变换器所能承受的最大电压时, 发电机的转子电流将不可控, 并进一步造成变换器的损坏。

由上面所得到的故障时的定子磁链表达式可以知道, 在定、转子电阻的作用下, 发电机定子磁链直流分量和转子磁链将逐渐衰减, 暂态故障对发电机的冲击也将随之减小。所以在电网电压跌落时, 我们可以通过旁路开关在电机的转子绕组中串入保护电阻来释放磁场储能并加快磁链的衰减, 从而缓

解故障对机组的冲击。通常是在双馈感应发电机的转子侧通过双向晶闸管连接一组保护电阻, 当转子电流很大的时候, 触发晶闸管, 将电阻接入到电机转子绕组中, 来保护变换器和电机, 这时电机的定子既可以从电网脱离<sup>[8]</sup>, 也可以继续保持和电网的连接, 以使故障消失后能够尽快地回到正常运行状态<sup>[4]</sup>。

尽管较大的转子保护电阻能够有效地抑制转子电流峰值, 更快地吸收转子磁场的储能, 然而旁路电阻过大又会使转子电压过高, 会引起对直流侧电容的反充电从而损坏变换器, 而且还有可能击穿发电机转子绕组绝缘, 所以转子保护电阻的设计要从两方面来考虑:

1) 保护电阻不能过小, 要能限制转子短路电流不超过发电机和变换器所允许的最大电流。

2) 转子电阻不能过大, 以避免电机转子侧出现高电压, 超过感应发电机转子绕组和变换器所能承受的最大电压。

当保护电路开始工作时, 旁路电阻  $R_c$  串接在双馈感应发电机的转子绕组上, 此时, 转子电流的衰减时间常数变成:

$$T_r^* = \frac{L_r'}{R_r + R_c} \quad (39)$$

$T_r^*$  变小会加快转子电流的衰减, 从而进一步抑制故障电流。

转子故障电流也由于旁路电阻的串入而变小, 其峰值为:

$$i_{r\max} = -\frac{E_g L_m}{\sqrt{R_c^2 + (\omega_0 L_r')^2} L_s} (e^{-\frac{T}{2T_r^*}} + e^{-\frac{T}{2T_s}}) \quad (40)$$

式(42)是双馈发电机在保护电阻工作时的转子最大故障电流, 它的值仅取决于双馈感应发电机的参数和接入的保护电阻的值。忽略定子漏抗, 假设双馈感应发电机和转子侧变换器所允许的最大电流值为  $i_{\max}$ , 则转子电路保护电阻的值应满足:

$$R_c > \sqrt{\frac{E_g^2 (e^{-\frac{T}{2T_r^*}} + e^{-\frac{T}{2T_s}})^2}{i_{r\max}^2} - (\omega_0 L_r')^2} \quad (41)$$

双馈发电机的转子电压在旁路电阻工作时, 可表示为:

$$v_r = i_{r\max} R_c \quad (42)$$

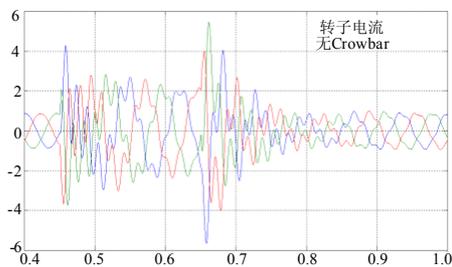
为避免转子电压过高, 旁路电阻的最大值应满足式(43):

$$R_c < \frac{v_{rmax}(\omega_0 L_r')}{\sqrt{E_g^2(e^{\frac{T}{2T_r'}} + e^{\frac{T}{2T_s'}})^2 - v_{rmax}^2}} \quad (43)$$

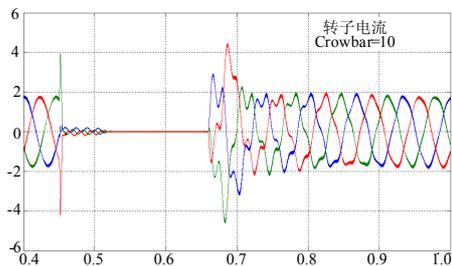
其中： $v_{rmax}$  为转子电压的最大峰值，它由发电机转子绕组所能承受电压的最大值和变换器为避免反充电所能承受的电压最大值共同决定。

#### 4.2 仿真研究

图2所示的是 Matlab/Simulink 平台下的电网发生三相短路故障时的双馈发电机转子电流的仿真波形，电机、变换器等仿真参数见表1。电网的故障发生时间为 0.45 s，恢复时间为 0.65 s，机端电压的跌落深度为 80%，即跌落后的双馈发电机机端电压为 0.2 p.u.。



(a) 无保护电阻的双馈发电机转子电流



(b) 带保护电阻的双馈发电机转子电流

图2 三相短路故障时的双馈发电机转子电流

Fig.2 Rotor current of DFIG wind turbine

表1 仿真参数 (标么值)

Tab.1 Parameters of Simulation

参数	值	参数	值
定子电阻	0.007 1	定子漏感	0.171 0
转子电阻	0.005	转子漏感	0.156 0
互感	2.9	极对数	3
进线电阻	0.003	进线电抗	0.3
功率	1.5 MW	保护电阻	10 Ω

从图 2(a)中可以看出，无 Crowbar 保护时，故障时转子电流峰值将达到 4 p.u.，故障清除时，更达到 6 p.u.。并且在无 Crowbar 保护时，故障期间转子侧变换器一直在试图调节转子电流，这样使得转子故障电流的谐波成份更加严重。采用 Crowbar 保护

后，有效地抑制了故障电流的上升，使得故障电流的最大值在 2 p.u.左右，图 2(b)。从仿真结果可以看出采用 Crowbar 保护策略可以加速电磁暂态过程的衰减，抑制转子过电流，从而保证风力发电机组的安全。

#### 5 结论

通过对电网三相短路故障下双馈发电机内部电磁过渡过程的分析，推导出了双馈风力发电机的定子磁链，转子电压，直流侧电压以及电流等在电网三相短路故障下的数学表达式，分析了双馈发电机的运行状态对其过渡过程的影响。给出了电网三相短路故障时双馈发电机的定、转子故障电流的表达式，并在此基础上确定了故障电流的最大值及其发生时刻。提出了双馈风力发电机的转子保护电路的具体设计方法及计算依据，并进行了仿真验证。

本文的研究成果对深刻理解电网三相短路状态下的风电系统的动态响应特性并进一步实现双馈风力发电系统的保护和不间断运行具有重要的理论指导意义。

#### 参考文献

- [1] Jauch C, Sorensen P, Bak-Jensen B. International Review of Grid Connection Requirements for Wind Turbine[A]. In: Nordic Wind Power Conference NWPC'04[C]. Helsinki Finland: 2004. 135-140.
- [2] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (2): 1-8.  
ZHANG Xing, ZHANG Long-yun, YANG Shu-ying, et al. Low Voltage Ride-through Technologies in Wind Turbine Generation[J]. Proceeding of the CSU-EPSCA, 2008, 20 (2): 1-8.
- [3] ZOU He-ping, SUN Hui, ZOU Ji-yan. Fault Ride-through Performance of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator[A]. in: Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications[C]. 2007. 1607-1611.
- [4] Morren J, de Haan S W H. Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator During a Voltage Dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [5] Kayikci M, Milanovic J V. Assessing Transient Response of DFIG-based Wind Plants-the Influence of Model Simplifications and Parameters[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (2): 545-554.
- [6] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Transient State Analysis of a Doubly-Fed Induction Generator under Three Phase Short Circuit[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62-68.

(下转第48页 continued on page 48)

仿真中假设的电网畸变电压波形如图 4 (a) 所示, 负荷电流波形不变。通过图 2 的变换, 可分离出电网电压的基波波形, 如图 4 (b)。图 4 (c) 和 (d) 分别为检测出的负载基波有功电流和谐波及无功综合补偿电流。

两种电压条件下, 仿真时假设的负载电流波形是一致的, 通过仿真结果可以看出, 检测出来的谐波及无功综合电流波形是相同的, 这亦证明了本文提出的检测方法不受电网电压波形畸变影响, 检测结果准确。

#### 4 结论

本文提出的无锁相环单相电路谐波和无功电流检测方法, 通过构造任意初相位的基频正余弦信号, 经过基本变换后, 能够分离出电压或电流的基波分量和基波有功分量, 从而最终检测出需要有源滤波器补偿的谐波和无功综合补偿电流。该方法的实现不受电网电压畸变的影响, 不存在锁相环电路, 实施简单方便, 有利于用 DSP 等数字芯片实现。

#### 参考文献

[1] 王兆安, 杨军, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Control and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[2] 杨杰, 赖声礼, 李心广, 等. 三相电压不对称时谐波与基波有功、无功电流的精确检测方法研究[J]. 继电器, 2003, 31(4): 6-9.  
YANG Jie, LAI Sheng-li, LI Xin-guang, et al. Research on Precision Detection Method of Harmonics Fundamental Active Current and Reactive Current in the Case of Asymmetrical Three-phase Voltage[J]. Relay, 2003, 31(4): 6-9.

[3] 王玉斌, 吕燕, 李英俊. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测新方法[J]. 继电器, 2006, 34(18): 47-51.  
WANG Yu-bin, Lü Yan, LI Ying-jun. New Precision Detection Method of Harmonics and Reactive Current under Asymmetrical Three-phase Voltage[J]. Relay, 2006, 34(18): 47-51.

[4] 任永峰, 李含寿, 贺纲, 等. 两种单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 95-98.  
REN Yong-feng, LI Han-shou, HE Gang. The Analysis of Two Real-time Detecting Approaches of Instantaneous Harmonic and Reactive Current in Single-phase Circuit[J]. Proceeding of the EPSA, 2003, 15(1): 95-98.

[5] 戴列峰, 蒋平, 田大强. 无锁相环 d-q 谐波电流检测法的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 46-49.  
DAI Lie-feng, JIANG Ping, TIAN Da-qiang. Realization of Harmonic Current Detection of d-q Transformation without Phase Lock Loop[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49.

[6] 尉冰娟, 王明渝, 张淑国. 无锁相环  $i_p-i_q$  法在有源滤波器中的实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2): 50-53.  
WEI Bing-juan, WANG Ming-yu, ZHANG Shu-guo. Realization of  $i_p-i_q$  Method without Phase Lock Loop in Active Filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2): 50-53.

[7] 周林, 张凤, 栗秋华, 等. 无锁相环  $i_p-i_q$  检测任意次谐波电流的新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 129-133.  
ZHOU Lin, ZHANG Feng, LI Qiu-hua, et al. New Algorithm for Random Harmonic Current Detection Using  $i_p-i_q$  without Phase Lock Loop[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 129-133.

[8] 蒋斌, 颜钢锋, 赵光宙. 单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 35-38.  
JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Method for Real-time Detecting Harmonic and Reactive Currents in Single Phase Circuit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 35-38.

收稿日期: 2009-04-22; 修回日期: 2009-08-03

#### 作者简介:

吕晓琴 (1980-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电能质量综合补偿技术; E-mail: xiaogin93@163.com  
张秀峰 (1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事供电技术、继电保护和电力电子技术方面的研究工作;  
章春军 (1981-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事铁道机车车辆方面研究。

(上接第 44 页 continued from page 44)

[7] Morren J, de Hann S W H. Short-Circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

[8] XIANG Da-wei, LI Ran, Tavner P J, et al. Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-through[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.

[9] HE Yi-kang, HU Jia-bing, ZHAO Ren-de. Modeling and Control of Wind-turbine Used DFIG Under Network Fault Conditions[A]. in: ICEMS[C]. 2005. 986-991.

[10] Petersson A. Analysis, Modeling and Control of

Doubly-fed Induction Generators for Wind Turbines[D]. Chalmers University of Technology, 2005.

[11] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation [J]. IEE Proc-Electr Power Appl, 1996, 143(3): 231-241.

收稿日期: 2009-04-15; 修回日期: 2009-06-04

#### 作者简介:

郭家虎 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动, 新能源发电。E-mail: hn\_gjh@163.com