

# 电压不对称骤升时 DFIG 暂态特性分析及控制策略改进

李耐心,王艳娟,孙潇,陈曦

(国网冀北电力有限公司 唐山市曹妃甸区供电分公司,河北 唐山 063299)

**摘要:**针对双馈感应风力发电机(DFIG)故障穿越问题,传统的研究大多只单独考虑电压对称下降或上升情况,但电压的恢复过程往往伴随着电压的升高,因此研究含电压下降和上升的不对称故障尤为重要。对两种典型不对称骤升故障期间的 DFIG 瞬态特性进行了理论推导,给出定子磁链变化规律;在此基础上,针对双闭环控制无法抑制故障期间转子电流和直流母线电压超限问题、Crowbar 保护带来的电机失控问题等,提出一种定子串电阻改进控制策略。仿真结果验证了理论分析的正确性,所提控制策略改善了 DFIG 的瞬态响应,有利于故障电网的恢复。

**关键词:**双馈感应发电机;高电压穿越;不对称故障;暂态特性;改进控制策略

**中图分类号:**TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21312

## Analysis of DFIG Transient Characteristics and Improvement of Control Strategy in Case of Voltage Asymmetry Swell

LI Naixin, WANG Yanjuan, SUN Xiao, CHEN Xi

(Tangshan Caofeidian District Power Supply Branch, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan 063299, Hebei, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of doubly-fed induction generator (DFIG) fault ride through, most of the traditional researches only consider the symmetrical voltage drop or rise, but the recovery process of grid voltage is often accompanied by voltage rise, so it is particularly important to study the asymmetric fault with voltage drop and swell. The transient characteristics of DFIG under two typical asymmetric sudden rise faults were theoretically derived, and the variation law of stator flux was given; on this basis, an improved control strategy of stator series resistance was proposed to solve the problem that the double closed-loop control can not restrain the rotor current and DC bus voltage is out of limit in the process of fault, and the motor is out of control caused by Crowbar protection. The simulation results verify the correctness of the theoretical analysis, and the proposed control strategy improves the transient response of DFIG, which is conducive to the restoration of grid voltage.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); high voltage ride through (HVRT); asymmetric fault; transient characteristics; improved control strategy

双馈感应风力发电机(DFIG)作为风电机组的主流机型,具有独特的性能以及价格优势。但其特殊的拓扑结构也使 DFIG 对故障穿越尤为敏感<sup>[1-5]</sup>。近年来,DFIG 的 LVRT 研究取得了长足发展,但高电压穿越(high voltage ride through, HVRT)研究甚少<sup>[6-10]</sup>。且传统的研究大多只单独考虑电压下降或上升情况,鲜有文献对电网电压恢复过

程中伴随的电压升高等现象进行研究。因此,对 DFIG 电压不对称故障下的瞬态特性及其控制策略进行研究是很有必要的。

文献[11]对 DFIG 在电压对称上升和下降过程中的瞬态特性进行了研究,但并不涉及电压不对称骤升的分析;文献[12]虽利用附件硬件电路抑制了故障电压,但并未对 DFIG 的瞬态特性进

**作者简介:**李耐心(1970—),男,硕士,高级工程师,Email:hblnx@126.com

**通讯作者:**王艳娟(1992—),女,硕士,Email:734741309@qq.com

行分析;文献[13]在缺乏理论验证的情况下分析了电压不对称骤升时DFIG的过渡过程;文献[14]对DFIG的功率和电磁转矩进行了分析,但并不涉及HVRT时DFIG的暂态特性;文献[15]着重对不对称故障恢复过程中的DFIG瞬态特性进行研究;文献[16]详细分析了DFIG在不同时刻恢复后的暂态特性,但并未涉及电网电压不对称故障及在不同故障发生时刻下的暂态特性。对于DFIG故障穿越控制策略,文献[17]给出加快定子磁链暂态分量的去磁控制,但对电磁转矩没有抑制作用;文献[18-19]根据功率的关系,给出无功调节的HVRT控制策略。

上述文献虽有对电压不对称骤升故障下的瞬态特性进行分析,但并不涉及单相电压跌落两相电压上升等常见的混合不对称骤升故障,且鲜有文献对混合不对称骤升故障期间的瞬态特性进行分析。

针对上述问题,本文对两种典型不对称骤升故障期间的DFIG暂态特性进行了理论推导,给出 $\Psi_s$ 的变化规律;在此基础上,针对双闭环控制无法抑制故障期间转子电流和直流母线电压超限问题、Crowbar保护带来电机失控问题等,提出一种定子串电阻的改进控制策略。所提控制策略改善了DFIG瞬态响应,有利于电网电压的故障恢复。

## 1 DFIG 数学模型

按照电动机惯例,DFIG在定子坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + p\Psi_s \\ U_r = R_r I_r + p\Psi_r - j\omega_r \Psi_r \\ \omega_{sl} = \omega_1 - \omega_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_s, I_s, \Psi_s$ 分别为定子电压、电流、磁链矢量; $U_r, I_r, \Psi_r$ 分别为转子电压、电流、磁链矢量; $R_s, L_s, R_r, L_r$ 分别为定、转子电阻和电感; $L_m$ 为定、转子间互感; $\omega_1, \omega_r, \omega_{sl}$ 分别为同步旋转角速度、转子旋转角速度、滑动角速度; $p$ 为微分算子。

## 2 不对称骤升时DFIG暂态特性

电压不对称骤升后,根据对称理论可知,此时的 $U_s$ 可表示为正序、负序、零序分量之和:

$$U_s = U_p e^{j\omega_1 t} + U_n e^{-j\omega_1 t} + U_0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_n \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad \alpha = e^{j120^\circ}$$

式中: $U_p, U_n, U_0$ 分别 $U_s$ 的正序、负序、零序电压幅值。

### 2.1 两相电压下降、单相电压上升

发生A相电压下降,B,C两相电压上升不对称故障时:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_n \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-d)U_s \\ (1+m)\alpha^2 U_s \\ (1+m)\alpha U_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_s \begin{bmatrix} 3+2m-d \\ -(d+m) \\ -(d+m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $d, m$ 为电压下降、上升的幅度。

正、负序电压分别产生以 $\omega_1$ 正反向旋转的磁链,且由于 $R_s$ 较小,忽略 $R_s$ 后由式(1)可知此时 $U_p, U_n$ 产生的 $\Psi_p, \Psi_n$ 分别为

$$\Psi_p = \frac{(3+2m-d)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} \quad (5)$$

$$\Psi_n = \frac{(d+m)U_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} \quad (6)$$

由于 $\Psi_s$ 不能突变,电压不对称上升过程中,产生一个自然磁链 $\Psi_0$ :

$$\Psi_0 = \Psi_0 e^{-t/\tau_s} \quad (7)$$

叠加式(5)~式(7),此时的 $\Psi_s$ 为

$$\Psi_s = \Psi_p + \Psi_n + \Psi_0 \quad (8)$$

若不对称故障在 $t_0 = kT/2$ 时发生,此时 $\Psi_p, \Psi_n$ 方向相同, $\Psi_s$ 为

$$\Psi_s = \frac{(3+2m-d)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} + \frac{(d+m)U_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} - \frac{mU_s}{j\omega_1} e^{-t/\tau_s} \quad (9)$$

若不对称故障在 $t_0 = (2k+1)T/4$ 时发生,此时 $\Psi_p, \Psi_n$ 方向相反, $\Psi_s$ 为

$$\begin{aligned} \Psi_s = & \frac{(3+2m-d)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} + \frac{(d+m)U_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} + \\ & \frac{(2d-m)U_s}{3j\omega_1} e^{-t/\tau_s} \end{aligned} \quad (10)$$

### 2.2 单相电压上升、两相电压不变

电网电压发生A相电压下降,B,C两相电压不变的故障时:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_n \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1+m)U_s \\ \alpha^2 U_s \\ \alpha U_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_s \begin{bmatrix} 3+m \\ m \\ m \end{bmatrix} \quad (11)$$

此时 $U_p, U_n$ 产生的 $\Psi_p, \Psi_n$ 分别为

$$\Psi_p = \frac{(3+m)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} \quad (12)$$

$$\Psi_n = -\frac{mU_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} \quad (13)$$

若不对称故障在  $t_0 = kT/2$  时发生,此时  $\Psi_p$ ,  $\Psi_n$  方向相同,其和最大,且与故障前的  $\Psi_s$  大小相同,此时  $\Psi_0 = 0$ ,  $\Psi_s$  为

$$\Psi_s = \frac{(3+m)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} - \frac{mU_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} \quad (14)$$

若不对称故障在  $t_0 = (2k+1)T/4$  时发生,此时  $\Psi_p$ ,  $\Psi_n$  方向相反,  $\Psi_0$  的幅值最大,为单相电压骤升、两相电压不变的不对称故障中最严重的情况,此时的  $\Psi_s$  为

$$\Psi_s = \frac{(3+m)U_s}{3j\omega_1} e^{j\omega_1 t} - \frac{mU_s}{3j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} - \frac{2mU_s}{3j\omega_1} e^{-t/\tau_s} \quad (15)$$

### 3 改进控制策略

为抑制单相电压降落、两相电压骤升等电压不对称故障带来的转子电流升高等不利影响,本文提出一种定子串电阻的改进控制策略。图1给出了改进控制策略拓扑图。

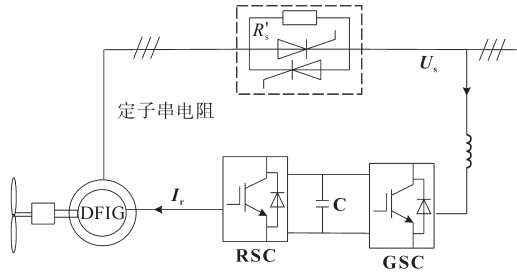


图1 定子串电阻电路拓扑图

Fig. 1 Stator series resistance circuit topology

#### 3.1 定子串电阻电路分析

根据式(1)、式(2)可得转子电压为

$$U_r = R_r' I_r + j\omega_1 \sigma L_\sigma I_r + L_\sigma \frac{dI_r}{dt} + E_r \quad (16)$$

其中

$$E_r = \frac{L_m}{L_s} (U_s - \frac{R_s}{L_s} \Psi_s - j\omega_r \Psi_s) \quad (17)$$

$$L_\sigma = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \quad (18)$$

$$R_r' = R_r + (\frac{L_m}{L_s})^2 R_s \quad (19)$$

式中:  $R_r'$  为转子等效电阻。

由式(19)可以看出,增加  $R_r$  或  $R_s$  均能增大

$R_r'$ ,  $R_r'$  的增大加快了故障过程中  $I_r$  的衰减速度,抑制了  $I_r$  的增加。此外,由于  $(L_m/L_s)^2 \gg 1$ , 因此,定子串电阻所需  $R_s$  要小很多,很小的  $R_s$  就能抑制较大的转子过电流,所以定子回路串联电阻来抑制不对称故障更具优势。

由于  $R_s$  的投入对系统本身也是一种干扰,因此采取  $I_r$  与其安全极限进行比较,以此控制  $R_s$  的投切。此外,本控制策略在DFIG不对称骤升时无需封锁RSC,解决了Crowbar保护电路存在的电机失控问题。

#### 3.2 $R_s$ 阻值整定

在  $R_s$  的阻值选取时,过小的  $R_s$  对  $I_r$  起不到抑制作用,但过大的  $R_s$  则会对系统的稳定运行造成不利影响,因此,在满足  $I_r \leq I_{r\_lim}$  的情况下尽可能减小  $R_s$  的取值,以减小附加电阻对系统的不利影响。

根据我国故障穿越的要求:当  $U_s$  下降到0.2(标么值)后,DFIG应维持625ms继续运行,因此  $\tau_s = 156.25$ ms, 定子串电阻后,有:

$$t_s' = L_s / (R_s + R_s') \quad (20)$$

因此,  $R_s'$  为

$$R_s' = L_s / 0.156 - R_s \quad (21)$$

### 4 仿真分析

在Matlab/Simulink仿真平台搭建如图1所示的含定子串电阻电路的DFIG仿真模型。其中双馈感应发电机参数为:额定功率2MW,额定频率50Hz,定子额定电压690V,直流母线额定电压1200V,定子电阻0.0108(标么值),转子电阻0.0102(标么值),定子漏感0.102(标么值),转子漏感0.11(标么值),定转子间的互感3.362(标么值)。仿真过程中,由于MW级DFIG转动惯量较大,且电网电压骤升暂态过程较短,因此在整个过程中认为DFIG转速不变。

#### 4.1 暂态特性分析

图2和图3分别给出了DFIG发生单相电压下降两相电压上升、单相电压上升两相电压不变的不对称故障下,DFIG的  $\Psi_s$  运行轨迹。由图2、图3可知,DFIG发生不对称故障后  $\Psi_s$  以2倍工频振荡,且发生单相电压下降两相电压上升时  $\Psi_s$  的  $d, q$  轴分量振荡幅度明显大于DFIG发生单相电压上升两相电压不变的不对称故障,单相电压下降两相电压上升的不对称故障对系统影响更大。

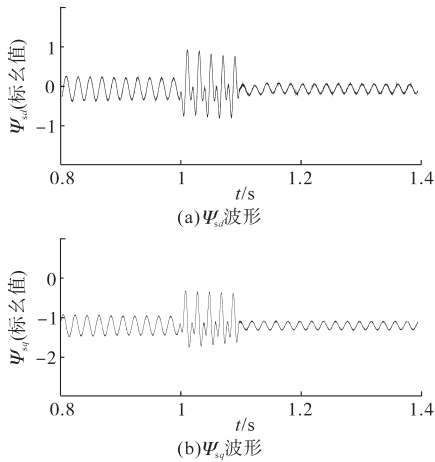


图2 单相电压下降两相电压上升  $\Psi_s$  仿真图  
Fig. 2 Stator flux simulation diagram under signal voltage fall two voltage swell

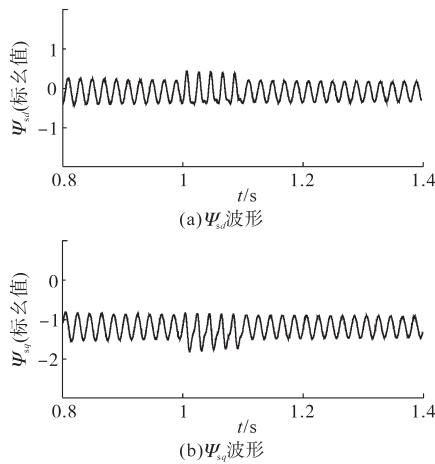


图3 单相电压上升时  $\Psi_s$  仿真图

Fig. 3 Stator flux  $\Psi_s$  simulation diagram under single phase voltage fall

#### 4.2 两相电压下降、单相电压上升故障分析

图4和图5分别给出了  $t = 1\text{s}$  时发生A相电压下降至0.2(标么值),B,C两相电压上升至1.3(标么值),  $t = 1.1\text{s}$  时故障恢复,采用传统双闭环控制和本文所提控制策略下的DFIG动态响应。由图4中  $I_r$  和  $U_{dc}$  波形可以看出,传统双闭环控制下,单相电压下降两相电压上升时,  $I_r$  的峰值达到3(标么值),远大于其安全限值2(标么值);  $U_{dc}$  峰值达到1.8(标么值),远大于其安全限值1.2(标么值),出现转子过电流和直流母线过电压情况,且由  $T_e$  波形可知,故障期间,  $T_e$  波动幅度较大。改进控制策略下,由图5可知,  $I_r$ ,  $U_{dc}$  的峰值都抑制在安全限值2(标么值)和1.2(标么值)以内,消除了转子过电流和直流母线过电压的不利影响。且  $T_e$  的振荡幅度明显减小。DFIG在改进控制策略下瞬态响应显著优于双闭环控制。

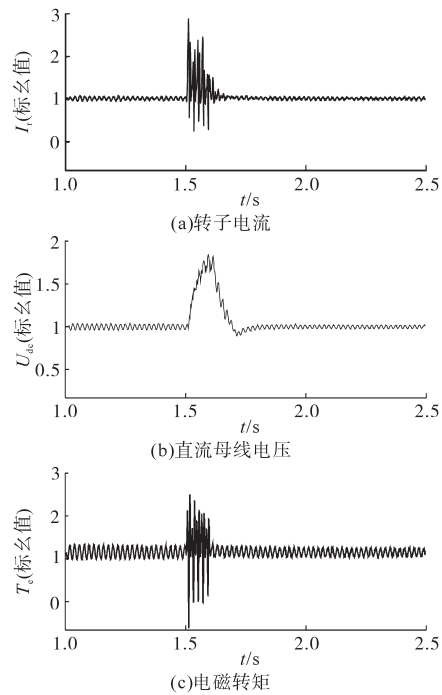


图4 双闭环控制下DFIG动态响应

Fig. 4 Dynamic response of DFIG under double closed loop control

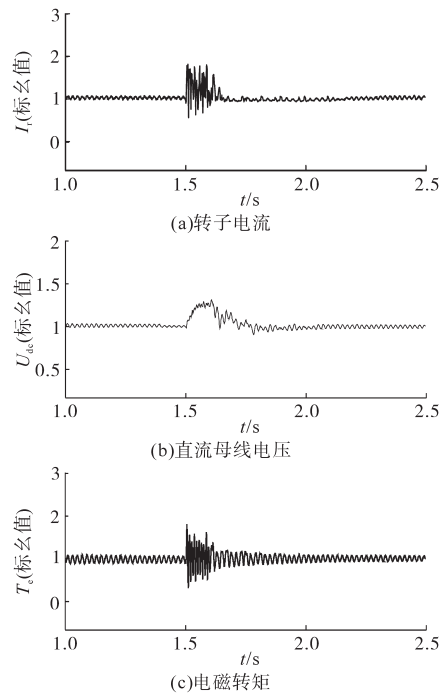


图5 改进控制下DFIG动态响应

Fig. 5 Dynamic response of DFIG under improve control

#### 4.3 单相电压上升、两相电压不变故障分析

图6和7分别给出了  $t = 1\text{s}$  时发生A相电压上升至1.3(标么值),B,C两相电压不变,  $t = 1.1\text{s}$  时故障恢复,采用传统双闭环控制和本文所提控制策略下的DFIG动态响应。对比双闭环控制策略,定子串电阻控制下  $I_r$  和  $U_{dc}$  的骤升幅度有

所减小,且 $T_e$ 的动态响更具优势,有利于故障穿越的实现。

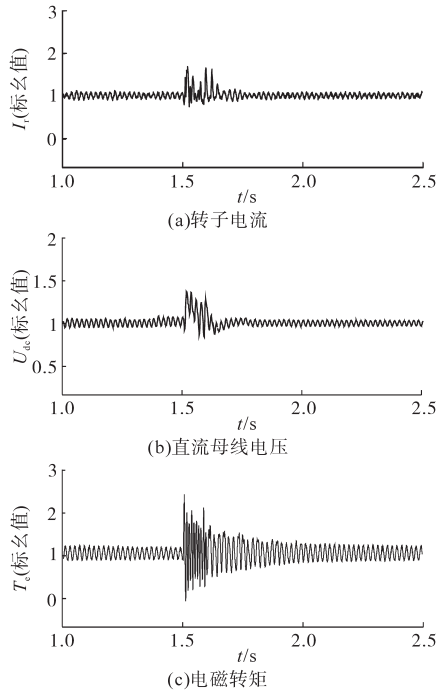


图6 双闭环控制下单相电压骤升时DFIG动态响应

Fig. 6 Dynamic response of DFIG under double closed loop control of signal phase voltage swell

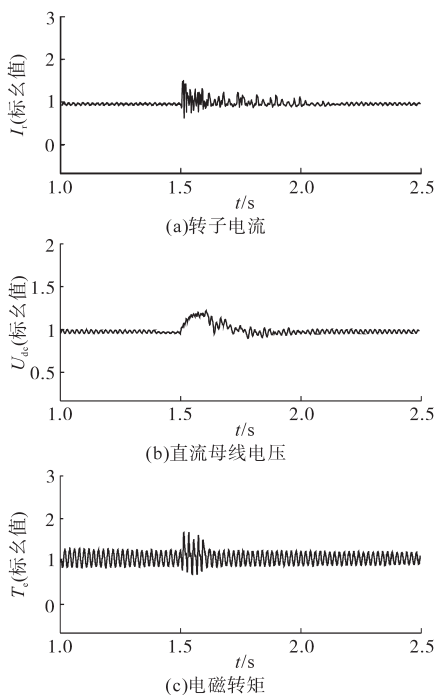


图7 改进控制下单相电压骤升时DFIG动态响应

Fig. 7 Dynamic response of DFIG under improve control of signal phase voltage swell

为直观对比两种不对称骤升故障(单相电压下降两相电压上升较单相电压上升两相电压不变)在双闭环控制策略与改进控制策略下DFIG

的动态响应性能,根据图4至图7给出DFIG的 $I_r$ ,  $U_{dc}$ ,  $T_e$ 峰值如表1所示。

表1 DFIG动态响应对比

Tab. 1 Dynamic response compare of DFIG

骤升模式	控制策略	$I_r$ 峰值 (标么值)	$U_{dc}$ 峰值 (标么值)	$T_e$ 峰值 (标么值)
单相电压下降 两相电压骤升	双闭环	3.00	1.80	2.60
	改进控制	1.70	1.40	2.47
单相电压骤升 两相电压不变	双闭环	1.85	1.20	1.80
	改进控制	1.50	1.15	1.60

从表1可以看出,DFIG在改进控制策略下的瞬态响应显著优于双闭环控制,且 $I_r$ ,  $U_{dc}$ ,  $T_e$ 峰值均在安全限值以内,本文所提的改进控制策略优化了DFIG的动态性能;此外,单相电压下降两相电压上升较单相电压上升两相电压不变的不对称故障对系统的影响更大,且故障恢复后DFIG的过渡过程较长,DFIG恢复至稳定运行所需的时间较多。

## 5 结论

本文对单相电压下降两相电压上升、单相电压上升两相电压不变的2种典型不对称骤升故障进行了分析,在此基础上提出定子串电阻控制策略,得出以下结论:

1)故障发生时刻不同, $\Psi_p$ ,  $\Psi_n$ 的方向相同, $\Psi_s$ 的幅值也不同。若故障在 $t_0 = kT/2$ 时发生, $\Psi_s$ 幅值较小;故障在 $t_0 = (2k + 1)T/4$ 时发生, $\Psi_s$ 幅值较大;

2)混合不对称故障期间, $\Psi_s$ 以2倍工频振荡;

3)定子串电阻控制策略较双闭环控制策略能将 $I_r$ 和 $U_{dc}$ 的峰值抑制在安全限值以内,且DFIG始终处于可控状态,解决了Crowbar保护电路的失控问题;

4)单相电压下降两相电压上升较单相电压上升两相电压不变的不对称故障 $\Psi_s$ 振荡幅度增大,对系统的影响较大,且故障恢复后DFIG的过渡过程较长。

## 参考文献

- [1] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27):1-15.
- [2] 胡家兵,孙丹,贺益康,等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):21-26.
- [3] Abdel-Baqi O, Nasiri A. A dynamic LVRT solution for doubly-