

# 基于 Crowbar 保护的双馈感应发电机暂态特性与参数设计

熊 威, 邹旭东, 黄清军, 梁宗泽, 陈鉴庆, 康 勇

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074)

**摘要:** 双馈风力发电系统中, Crowbar(撬棒)仍是实现低电压穿越的常用方案之一, 传统的分析方法忽略了定、转子磁链间的耦合, 会带来较大的分析误差并遗漏一些暂态特性。从双馈感应发电机的数学模型出发, 通过分析端口电压发生对称跌落、投入 Crowbar 后双馈感应发电机的暂态过程, 推导出了定子磁链、定子电流、转子电流的解析表达式, 并在表达式的基础上分析了各暂态量的幅值和变化规律等特性。在 MATLAB/Simulink 中建立了双馈感应发电机的仿真模型, 结果证明了表达式的准确性。从复杂的数学表达式中抽离出 Crowbar 阻值与暂态特性的关系, 分析了不同的 Crowbar 阻值对于故障期间系统的功率、电磁转矩的影响, 并结合转子电流峰值计算及直流母线电压钳位效应的限制, 给出了一种 Crowbar 电阻取值方案, 该方案将有助于实际工程中选取合适的 Crowbar 参数。

**关键词:** 风力发电; 双馈感应发电机; 低电压穿越; 撬棒; 短路电流; 故障分析

## 0 引言

近年来, 随着风电场并网数量稳步增加, 风力发电机组与电网之间的相互扰动已成为研究的热点问题<sup>[1-2]</sup>。而在各类风力发电机组中, 双馈感应发电机(DFIG)以其调速范围宽, 有功、无功功率可独立调节以及励磁变频器容量小等优点, 成为风力发电机组中的主流机型<sup>[3]</sup>。

当电网电压因故障而骤降时, 由于定、转子磁链不能突变, 发电机定、转子磁链中的直流分量将在转子侧感应出很高的电动势, 当感应电动势超过转子变频器的控制能力时, 转子侧过电流可能会对变频器造成损坏<sup>[4-5]</sup>。因此, 常在转子侧接入 Crowbar 电路来抑制短路电流, 保护变频器<sup>[6]</sup>。一旦检测到转子侧电流过高, 就迅速封锁变频器输出, 同时投入 Crowbar 电路, 电路结构如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

故障下定、转子电流的准确计算和分析是进行电力系统故障分析计算的关键<sup>[8-10]</sup>, 也是合适选取 Crowbar 电阻值的前提。目前, 国内外对于故障下短路电流的推导和 Crowbar 电阻的选择已有了相当的研究, 如文献<sup>[11-12]</sup>通过对低电压穿越的物理过程进行分析, 在对定子电流分量做出相关假设的

基础上对短路电流进行了推导, 文献<sup>[13]</sup>对电机模型进行了简化, 在忽略转子磁链到定子磁链的耦合, 并假定定子磁链直流分量不衰减的基础上推导了定、转子电流的幅值, 文献<sup>[14]</sup>将电网故障后的电磁暂态过程处理为不同状态的叠加, 采用叠加法计算转子暂态电流。现有文献虽在一定程度上揭示了故障下磁链和电流的变化规律, 但忽略了定、转子绕组相对运动及相互耦合对对侧磁链的影响, 直接认定定子暂态磁链为一个单调衰减的直流分量, 其衰减时间常数约为定子等效电感与定子电阻的比值。

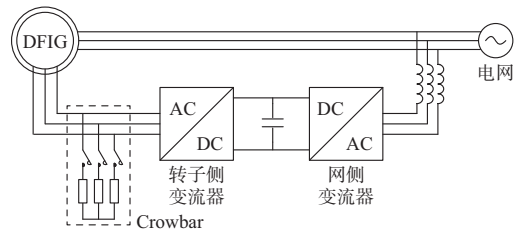


图 1 基于 Crowbar 保护的双馈系统  
Fig.1 Doubly-fed induction generator system with Crowbar protection

本文从 DFIG 的数学模型出发, 完整推导了端口电压对称跌落下, 定子磁链、定子电流、转子电流的解析表达式, 然后通过仿真验证了推导的准确性。在解析表达式的基础上, 抽离出定子磁链、定转子电流与 Crowbar 电阻之间的相互关系, 根据实际电机中的参数关系, 对表达式进行了化简。通常 Crowbar 电阻的取值是基于电阻上过电压不超过母

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-12-10。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215100); 国家自然科学基金资助项目(51477064); 光宝电力电子技术科研基金资助项目(2013-04)。

线电压钳位值的原则,由于现有文献中转子过电流的计算有一定误差,在此基础上设计的 Crowbar 阻值可能并不合适,本文基于准确的转子电流计算,并结合 Crowbar 阻值对故障期间系统的功率与电磁转矩的影响,给出了一种优化的 Crowbar 电阻设计方案。与现有的短路电流计算方法不同,现有文献所给出的算法大都是在推导的过程中进行大量简化,导致最终表达式不准确,而本文严格按照完整的双馈感应发电机数学模型进行推导,从推导出的表达式出发,通过相应的变换,使各个暂态量变化规律的分析更加准确,物理意义更加明显。

## 1 对称故障下 DFIG 的暂态分析

### 1.1 DFIG 数学模型

在静止坐标系下,采用矢量形式表示定、转子侧的电压、电流、磁链,定、转子侧均采用电动机惯例,DFIG 的数学模型如下。

电压方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \\ \mathbf{U}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m e^{j\theta} \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = L_r \mathbf{i}_r + L_m e^{-j\theta} \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{U}, \mathbf{i}, \boldsymbol{\psi}$  分别为电压、电流、磁链矢量;  $R$  为电阻;下标  $s, r$  表示定子和转子;  $\theta = \omega_r t$  表示转子位置角,其中  $\omega_r$  为转子角频率,在定子坐标系下,定子电压、电流、磁链等物理量的频率为同步频率,例如  $\boldsymbol{\psi}_s = \psi_s e^{j\omega_s t}$ ,  $\omega_s$  为同步角频率,而在转子坐标系下,转子各物理量的频率为转差频率,如  $\boldsymbol{\psi}_r = \psi_r e^{j\omega_2 t}$ ,  $\omega_2$  为转差角频率。

### 1.2 定子磁链推导

由于端口电压跌落至 Crowbar 投入间的时间很短,该过程影响可忽略,假设在电压跌落瞬间投入 Crowbar,同时由于暂态过程持续时间较短,可近似认为电机转速不变<sup>[14]</sup>,此时转子侧被短路,转子侧电阻变为  $R_r + R_{\text{Crowbar}}$ ,将磁链方程代入电压方程,可得到以定子磁链与转子电流作为状态量的微分方程组:

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s = k \mathbf{U}_s + \frac{R_s L_m}{L_s} e^{j\theta} \mathbf{i}_r \quad (3)$$

$$\frac{L_{\delta s} d\mathbf{i}_r}{dt} + (R_r + R_{\text{Crowbar}}) \mathbf{i}_r = -\frac{L_m}{L_s} \frac{d(e^{-j\theta} \boldsymbol{\psi}_s)}{dt} \quad (4)$$

式中:  $k$  为端口剩余电压深度。记  $R_{rc} = R_r + R_{\text{Crowbar}}$ ,由式(3)和式(4)可得定子磁链的非齐次二

阶微分方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \boldsymbol{\psi}_s}{dt^2} + \frac{L_r R_s + R_{rc} L_s - j\omega_r L_s L_{\delta s}}{L_s L_{\delta s}} \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + \\ \frac{R_s (R_{rc} - j\omega_r L_r)}{L_s L_{\delta s}} \boldsymbol{\psi}_s = k \frac{d\mathbf{U}_s}{dt} + \\ \frac{R_{rc} - j\omega_r L_{\delta s}}{L_{\delta s}} k \mathbf{U}_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $L_{\delta s} = (L_r L_s - L_m^2) / L_s$  为漏感系数。约为定、转子漏感之和,该方程的解为:

$$\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{s1} e^{\lambda_1 t} + \psi_{s2} e^{\lambda_2 t} + \boldsymbol{\psi}_{su} \quad (6)$$

$\psi_{s1}, \psi_{s2}$  是两个与初始状态有关的量,其中特解为:

$$\boldsymbol{\psi}_{su} = \frac{k}{\frac{R_s}{L_s} R_{rc} + j\omega_2 L_r + j\omega_s} \mathbf{U}_s = \frac{k}{a + j\omega_s} \mathbf{U}_s \quad (7)$$

式(7)的物理意义可看做是 DFIG 在剩余电压下以鼠笼型异步电机稳态运行时所产生的磁链。

根据式(5),定子磁链暂态部分的特征方程为:

$$\lambda^2 + \left( \frac{L_r R_s + R_{rc} L_s - j\omega_r}{L_s L_{\delta s}} \right) \lambda + \frac{R_s (R_{rc} - jL_r \omega_r)}{L_s L_{\delta s}} = 0 \quad (8)$$

解出特征根的解析表达式,并根据实际电机参数进行相应化简和变换以便于分析(详细推导见附录 A):

$$\begin{aligned} \lambda_1 = -\frac{R_s}{L_s} \left( \frac{R_{rc} - j\omega_r L_r}{R_{rc} - j\omega_r L_{\delta s}} \right) \approx \\ -\frac{R_s}{L_s} \frac{R_{rc}^2 + \omega_r^2 L_r L_{\delta s}}{R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2} + j\omega_r \frac{R_{rc} R_s}{R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 = j\omega_r - \frac{L_r R_s + R_{rc} L_s}{L_s L_{\delta s}} + \frac{R_s}{L_s} \left( \frac{R_{rc} - j\omega_r L_r}{R_{rc} - j\omega_r L_{\delta s}} \right) \approx \\ -\frac{R_{rc}}{L_{\delta s}} \left[ \frac{R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2 + R_s R_{rc}}{R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2} \right] + \\ j\omega_r \left[ \frac{R_s R_{rc} - R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2}{R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中实部表示暂态磁链的衰减速率,虚部表示旋转速率。由于故障瞬间定、转子磁链和电流都不会突变,可得到边界条件方程组为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{s(0-)} = \boldsymbol{\psi}_{s(0+)} = \psi_{s1} + \psi_{s2} + \boldsymbol{\psi}_{su(0+)} \\ \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \Big|_{(0-)} = \lambda_1 \psi_{s1} + \lambda_2 \psi_{s2} + j\omega_s \boldsymbol{\psi}_{su(0+)} \end{cases} \quad (11)$$

解得故障下定子磁链的解析表达式为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_s = \left( -\frac{a + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \psi_{su0} + \frac{R_s i_{s0} + \lambda_2 \psi_{s0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{\lambda_1 t} + \\ \left( \frac{a + \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \psi_{su0} - \frac{R_s i_{s0} - \lambda_1 \psi_{s0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{\lambda_2 t} + \boldsymbol{\psi}_{su0} e^{j\omega_s t} \end{aligned} \quad (12)$$

结合式(9)、式(10)特征根的表达式可以发现,电网故障后,定子磁链并非是一阶单调衰减的直流分量,而是包含有两个衰减分量  $e^{\lambda_1 t}$  和  $e^{\lambda_2 t}$ ,其中  $\lambda_1$  的实部与撬棒电阻的取值密切相关,在撬棒电阻取值较小时衰减速率约为定子电阻与漏感系数的比值,而在撬棒取较大阻值时约为  $-R_s/L_s$ ,虚部中由于  $R_{rc}R_s \ll R_{rc}^2 + (\omega_r L_{\delta s})^2$ ,因此虚部的幅值很小,表明  $\psi_{s1} e^{\lambda_1 t}$  是一个衰减速度较慢,振荡频率很低的暂态分量,即通常所说的直流分量。实际电机中  $R_{rc} \gg L_{\delta s}$ ,  $\lambda_2$  的实部约为  $-R_{rc}/L_{\delta s}$ ,虚部的幅值趋近于转速  $\omega_r$ ,表明  $\psi_{s2} e^{\lambda_2 t}$  是一个快速衰减并且振荡频率约为转速频率的暂态分量。现有的文献已在不同程度上揭示了定子磁链直流分量  $\psi_{s1} e^{\lambda_1 t}$  的变化规律,甚至已有文献指出由于撬棒电阻的投入,使得转子侧电阻不可忽略,  $\psi_{s1} e^{\lambda_1 t}$  不再是相对定子静止的直流分量,而是一个缓慢旋转的分量<sup>[14]</sup>,但其分析的前提假设依然没有脱离将定、转子磁链认定为一阶单调衰减直流分量的思维定势。通过上述推导可以发现,定子暂态磁链除了含有低速旋转、缓慢衰减的主导分量外,还包含有一项快速衰减且振荡频率很高的暂态分量  $\psi_{s2} e^{\lambda_2 t}$ ,尽管衰减速率较快,但该分量在故障初期不可忽略,因此考虑到  $\psi_{s2} e^{\lambda_2 t}$  的作用使得故障初期的磁链和峰值电流计算更加准确。

### 1.3 定子电流推导

将定子磁链表达式(12)代入定子电压方程(1),得到定子电流的表达式为:

$$\begin{aligned} i_s = & \frac{\lambda_1 \lambda_2}{R_s (\lambda_2 - \lambda_1)} (e^{\lambda_2 t} - e^{\lambda_1 t}) \frac{U_{s0}}{j\omega_s} + \\ & \frac{\lambda_2 e^{\lambda_2 t} - \lambda_1 e^{\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} i_{s0} + \left( \frac{a}{R_s} e^{j\omega_s t} + \right. \\ & \left. \frac{a + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{\lambda_1}{R_s} e^{\lambda_1 t} - \frac{a + \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{\lambda_2}{R_s} e^{\lambda_2 t} \right) \frac{kU_{s0}}{j\omega_s} \quad (13) \end{aligned}$$

式中:  $U_{s0}$ ,  $i_{s0}$  为故障前初始电压、电流量,反映(0-)时刻电压、电流的幅值与相位信息。

### 1.4 转子电流推导

根据定子磁链方程(2)与定子电流方程(13),得转子电流的表达式为:

$$\begin{aligned} i_r e^{j\theta} = & \frac{L_s}{R_s L_m} \left[ \left( \lambda_1 + \frac{R_s}{L_s} \right) \left( -\frac{a + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \psi_{s0} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{R_s i_{s0} + \lambda_2 \psi_{s0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{\lambda_1 t} + \left( \lambda_2 + \frac{R_s}{L_s} \right) \cdot \right. \\ & \left. \left( \frac{a + \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \psi_{s0} - \frac{R_s i_{s0} + \lambda_1 \psi_{s0}}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) e^{\lambda_2 t} + \right. \\ & \left. \left( \frac{R_s}{L_s} - a \right) \psi_{s0} e^{j\omega_s t} \right] \quad (14) \end{aligned}$$

式中:  $\psi_{s0} = U_{s0}/(j\omega_s)$ ,  $\psi_{s0} = kU_{s0}/(j\omega_s)$ 。  $U_{s0}$ ,  $i_{s0}$  的意义与2.3节中所述相同。

## 2 仿真实验

结合实验平台中一台 10 kW 双馈感应发电机的实际参数,对故障发生后定、转子电流解析表达式的准确性进行仿真实验,双馈感应发电机参数如表 1 所示。

表 1 10 kW 双馈感应发电机参数  
Table 1 Parameters of a 10 kW doubly-fed induction generator

参数	数值(有名值)	数值(标么值)
定子线电压	380 V/50 Hz	
定子电阻	0.104 $\Omega$	0.007 2
转子电阻	0.104 $\Omega$	0.007 2
定子漏感	0.003 12 H	0.067 9
转子漏感	0.003 36 H	0.073 1
互感	0.103 H	2.24
Crowbar 电阻	0.6 $\Omega$	0.041 5

在 MATLAB/Simulink 中搭建双馈系统的仿真模型,仿真条件设定为:故障发生前定子输出额定有功功率 10 kW,输出无功为 0,双馈感应发电机在 20% 超同步速下运行,在系统运行至 0.25 s 时定子端口电压跌落至 40%,同时封锁变流器输出并投入 Crowbar。由于暂态过程的持续时间相对机械惯性时间常数较小,可认为转速变化不大,使电机工作在恒转速模式下,通过锁相和转子位置观测可分别得到电压跌落时刻电压的相位角以及转子位置角。将电机参数、仿真条件代入式(13)与式(14)中可求得定、转子故障电流的数值,并与定、转子故障电流的仿真结果进行比较。

图 2 为 0.25 s 故障发生后,定子  $\alpha, \beta$  轴电流的波形,图 2(a)表明,依据式(13)计算出的定子电流,其变化趋势与实际的故障电流几乎完全一致。在故障发生后 1~2 个基波周期(0.02 s)内,定子电流会振荡产生一个很高的峰值,0.45 s 后,逐渐衰减至稳态值。从图 2(b)可以看出,在故障发生后前两个基波周期中,电流峰值大小也与实际值完全吻合。因此,该定子电流的解析表达式能够精确地反映定子故障电流的暂态过程,以及峰值大小。

转子故障电流波形如图 3 所示,仿真中,双馈感应发电机定、转子匝比设定为 1:1。图 3 表明,依据式(14)计算得到的转子电流与实际故障电流几乎完全一致,从图中可以看出,在故障发生后两个基波周期内,转子电流振荡达到最大峰值,定子磁链中各分量由于转子的旋转使得感应出的转子侧电流包含多个频率的分量,在定子电压对称跌落的情况下,磁链的直流分量感应出一个转速频率的转子电流,稳态分量感应出一个转差频率的转子电流,经过一段

时间转速频率电流逐渐衰减为0。由仿真结果可知,式(14)精确反映了故障后转子电流的暂态特性及其与各系统参数之间的关系。

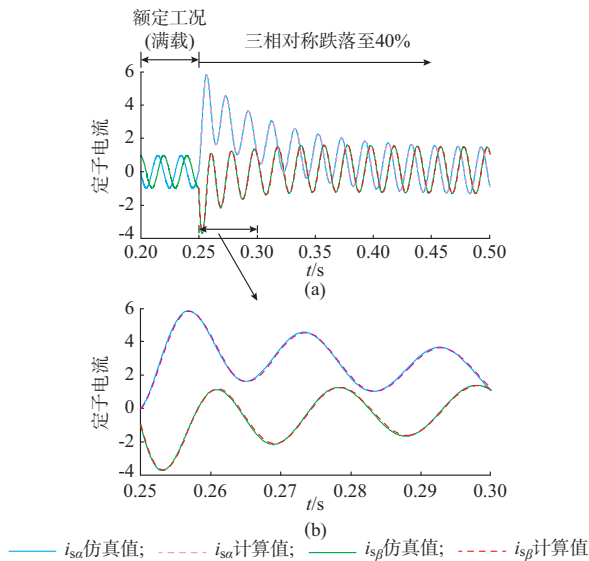


图2 定子故障电流  
Fig.2 Stator short circuit current

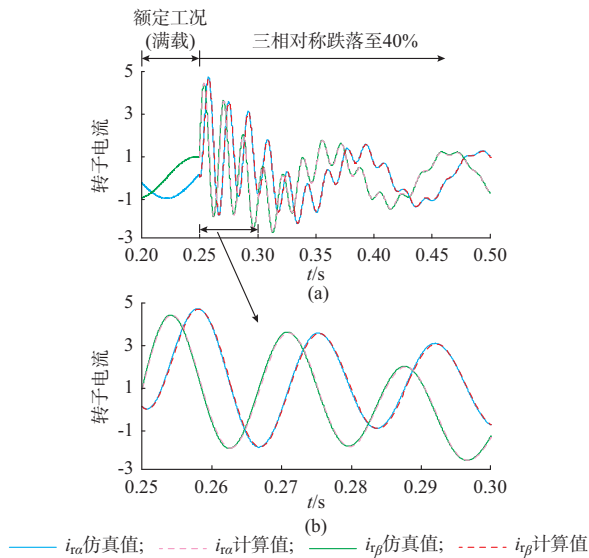


图3 转子故障电流  
Fig.3 Rotor short circuit current

在通常采用的简化分析方法中,端口电压全跌落情况下磁链的衰减时间常数可认为是定子等效短路电感与定子电阻的比值<sup>[15]</sup>  $T_s' = L_s' / R_s$ , 等效电感  $L_s' = L_{\sigma s} + L_{rs} L_m / (L_{rs} + L_m)$ , 其中  $L_{\sigma s}$ ,  $L_{rs}$  为定、转子漏感。全跌落情况下,简化分析方法计算的转子电流与本文中所推出的转子电流对比如图4所示。

图4表明,由于不计初始工况的影响,通常采用的简化分析方法与实际值在转子电流的峰值上有一

定的偏差,并且这个偏差的大小与初始工况密切相关,同时,根据前文对定子磁链的分析可知,暂态磁链将缓慢旋转而非静止,因此,从图4可以看到,简化分析方法与本文的改进方法,两者所算得的转子电流频率并不相同,在0.35s后两者相位出现较大差别。

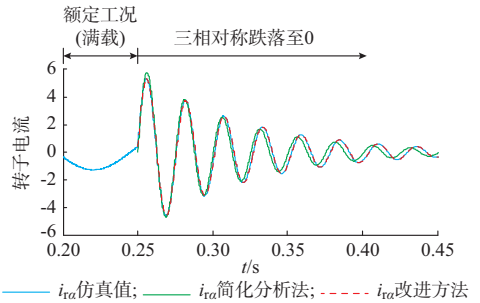


图4 转子故障电流  
Fig.4 Rotor short circuit current

文献[16]提出了一种部分跌落情况下故障电流的计算方法,尽管该方法揭示了定子磁链由于定、转子间的耦合,直流分量将缓慢旋转,但其认为快速衰减分量的振荡频率直接等于转速频率,由前文分析可知,其振荡分量的频率与撬棒电阻的大小有关。在三相对称跌落至40%的情况下,文献所提方法与本文方法的转子电流对比如图5所示。

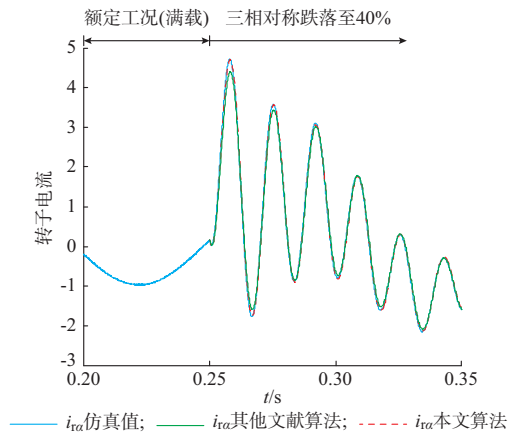


图5 非全跌落下转子故障电流  
Fig.5 Rotor fault current under 40% voltage sag

图5表明,在故障发生前期快速衰减分量所占比例较大,而其衰减时间常数与振荡频率与实际值存在偏差,导致故障初期转子故障电流峰值的估算存在一定的误差,并且该误差与系统参数密切相关。

### 3 Crowbar 电阻对故障期间暂态特性的影响

故障下定、转子电流发生突变的原因实质上是



由于定子端口电压发生变化时,定子磁链不能突变而产生的一个逐渐衰减的定子磁链直流分量所引起,因此定、转子电流暂态过程的变化规律与定子磁链的变化密切相关。根据定子磁链的表达式(12)分析可知,在电机参数已定的情况下,暂态过程主要由两方面决定,一是双馈感应发电机的初始运行工况,主要体现在  $i_{s0}$  对各分量幅值的影响,另一个则是 Crowbar 电阻值对特征根大小的影响,特征根的变化将引起磁链幅值和衰减时间的变化。其中后者正是本文讨论的重点。

### 3.1 Crowbar 阻值对特征根的影响

根据特征根的表达式(9)和式(10),代入一组实际电机参数,绘制不同 Crowbar 电阻下特征根值的曲线,如图 6 所示。电机参数如表 1 所示。

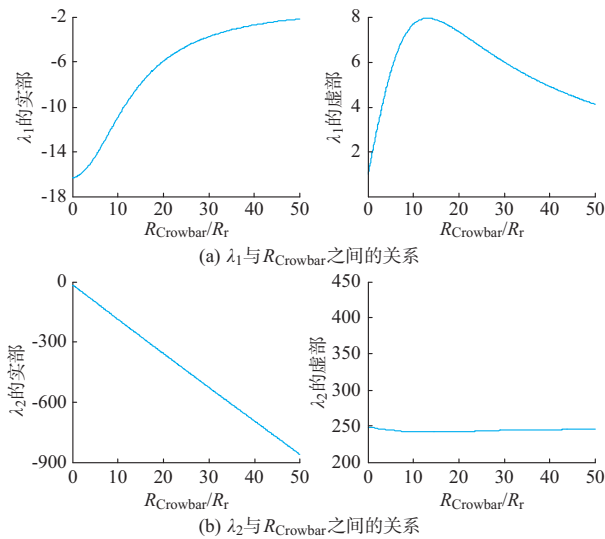


图 6 Crowbar 电阻增大时特征根取值  
Fig.6 Relations between Crowbar resistance and eigenvalues

当 Crowbar 电阻增大时,通过分析图 6(a)与式(9)可知,  $\lambda_1$  实部的绝对值减小,  $\psi_{s1} e^{\lambda_1 t}$  振荡频率会先增加再趋近于 0,而  $\lambda_2$  的实部绝对值急剧线性增加,虚部趋近于转速。意味着随着 Crowbar 阻值增大,磁链的直流分量  $\psi_{s1} e^{\lambda_1 t}$  衰减时间将变长,逐渐接近定子时间常数,同时不再是相对定子静止,而是缓慢旋转。而快速衰减分量  $\psi_{s2} e^{\lambda_2 t}$  会更快衰减为 0 并伴有高频率的振荡。

### 3.2 端口特性分析

考虑两个特征根的大小关系,对电流表达式进行化简分析:

$$i_s = \frac{\lambda_1 (k-1)U_s}{R_s j\omega_s} e^{\lambda_1 t} + \left( \frac{\lambda_1 (1-k)U_s}{R_s j\omega_s} + i_{s0} - \frac{a k U_s}{R_s j\omega_s} \right) e^{\lambda_2 t} + \frac{a k U_s}{R_s j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (15)$$

从功率波动的幅值来看,实际电机中,由于  $R_{rc} \gg L_{\delta s}$ ,  $e^{\lambda_2 t}$  将在 1~2 个基波周期内衰减为 0,但由于定子故障电流中快速衰减分量  $e^{\lambda_2 t}$  系数的幅值要大于  $e^{\lambda_1 t}$  系数的幅值,且振荡频率很高。因此在其衰减至 0 前,尤其在故障发生后第一个基波周期内,其影响不可忽略,定子电流会振荡产生很大的峰值,其幅值为两个暂态分量与稳态分量幅值的叠加。

从功率波动的频率来看,根据定子电流表达式(15)以及对特征根虚部的分析可知,由于定子暂态电流中存在一个衰减较慢的直流分量与一个衰减很快的转速频率分量,当其与频率为同步频率的端口剩余电压相乘,会使端口功率表现出同步频率的振荡,直至电流中的直流分量衰减殆尽。

通过仿真说明和分析该结论,设定跌落前双馈感应发电机运行工况为有功功率输出额定功率 10 kW,无功功率输出 0,转速为 20% 次同步速运行,0.25 s 端口电压发生 50% 跌落,功率如图 7 所示。

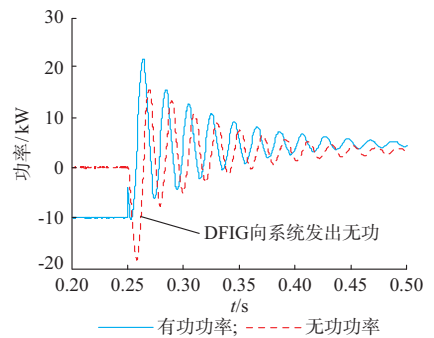


图 7 端口功率波形  
Fig.7 Stator port power

在故障发生初期,由于功率的振荡,双馈感应发电机会向系统馈送大量无功,对电网电压起到一定的支撑作用,但经过一个基波周期,由于暂态量的衰减以及定子电流的稳态分量的影响,双馈感应发电机逐渐变为从系统吸收无功功率,使系统故障发生恶化。根据式(15)分析可知,Crowbar 阻值的增大,  $\lambda_1$  绝对值的减小,会减小定子电流暂态分量的幅值,亦使功率振荡的幅值减小。

因此,较小的 Crowbar 电阻会使定子暂态电流的幅值更大,故障初期向系统馈送的无功更大,但较大的阻值会抑制故障期间功率的振荡。

### 3.3 电磁转矩分析

故障下的电磁转矩与定子端口功率和转子侧  $R_{rc}$  上消耗的功率密切相关,对故障过程进行仿真,仿真条件与 3.2 节中设定的条件相同,分别在  $R_{cb} =$

0.4 Ω, 0.6 Ω, 0.8 Ω 的情况下(记  $R_{cb} = R_{Crowbar}$ ), 观察电磁转矩的波形, 分析不同的 Crowbar 阻值对电磁转矩的影响。

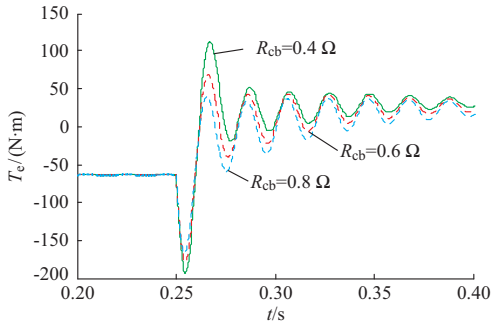


图8 电磁转矩波形  
Fig.8 Electromagnetic torque

电磁转矩的特性与定子端口功率特性变化规律相同, 通过上节分析可知, 电磁转矩将存在以近似同步频率振荡的衰减分量, 电磁转矩这种剧烈的、快速的振荡变化, 对双馈感应发电机的主轴造成很大的切轴应力冲击, 严重时可能损坏双馈感应发电机的机械系统。从图8可以看到, Crowbar 阻值越大, 电磁转矩振荡的峰值越小, 为避免故障发生瞬间主轴承受巨大的瞬时应力, Crowbar 电阻不可取得过小。

#### 4 电机初始运行工况对暂态峰值的影响

分析式(15)不难发现, 式(15)中的第一项为低频衰减量, 第二项为高频衰减量, 在全跌落情况下 ( $k=0$ ), 当第一项与第二项反向时,  $i_s$  将出现峰值。因此投入撬棒后大约半个转子电气角频率周期, 定子暂态电流会出现峰值。可求得定子暂态电流峰值为:

$$I_{smax} \approx \left\| \frac{\lambda_1}{R_s} \psi_{s0} + i_{s0} \right\| e^{\lambda_1 \frac{\pi}{\omega_r}} - \left\| \frac{\lambda_1}{R_s} \psi_{s0} \right\| e^{\lambda_1 \frac{\pi}{\omega_r}} \quad (16)$$

式中:  $\| \cdot \|$  表示矢量的模值。

对于定子侧在电动机惯例下, 忽略定子电阻的影响时, 定子磁链近似滞后定子电压  $\pi/2$ , 将式(16)中的各量在矢量图中表示, 如图9所示。根据各个量角度之间的关系, 记式(16)中的  $\lambda_1 \psi_{s0} / R_s = \boldsymbol{\varepsilon}$ , 由于复数  $\lambda_1$  的实部小于0, 虚部大于0, 所以  $\boldsymbol{\varepsilon}$  应超前于定子电压  $u_s$ , 设超前的角度为  $\theta_\varepsilon$ , 根据角度上的关系, 可以得到:

$$\tan \theta_\varepsilon = \frac{L_s R_{rc}^2 + \omega_r^2 L_r L_{\delta s} L_s}{\omega_r L_m^2 R_{rc}} \quad (17)$$

假设电网电压全跌落前, 双馈感应发电机满功率运行, 根据式(16)并结合图9可以发现, 当  $i_{s0}$  与  $\boldsymbol{\varepsilon}$  同向时, 即投入撬棒时  $i_{s0}$  位于图中的①位置时, 双

馈感应发电机处于吸收有功功率、输出无功功率状态, 这种工况最为恶劣, 定子电流暂态分量的峰值最大, 设此时电机吸收的有功功率为  $P$ , 输出的无功功率为  $Q$ , 则满足  $Q/P = \tan \theta_\varepsilon$ , 即满足功率因数  $\cos \varphi = 1/\sqrt{1 + \tan^2 \theta_\varepsilon}$ 。

当  $i_{s0}$  与  $\boldsymbol{\varepsilon}$  反向时, 即投入撬棒时  $i_{s0}$  位于图中的②位置时, 双馈感应发电机处于输出有功功率吸收无功功率状态, 暂态分量的峰值最小, 设此时电机输出的有功功率为  $P$ , 吸收的无功功率为  $Q$ 。

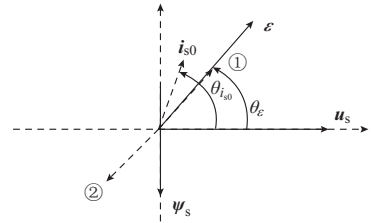


图9 初始功率状况的影响示意图  
Fig.9 Effect of initial operation condition

当电网电压全跌落前, 双馈感应发电机总视在功率保持不变条件下, 由状态①沿逆时针方向到状态②, 暂态电流峰值会越来越小, 由状态②沿逆时针方向到状态①, 暂态电流峰值会越来越大。据此可以得到, 在双馈感应发电机视在功率保持不变的条件下, 当双馈感应发电机输出有功功率吸收无功功率时, 随着功率因数的增大, 暂态电流峰值先减小后增大; 并且, 暂态电流峰值最小时输出的有功功率  $P$  和吸收的无功功率  $Q$  满足如下功率因数条件:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_\varepsilon}} = \frac{\omega_r L_m^2 R_{rc}}{\sqrt{1 + (L_s R_{rc}^2 + \omega_r^2 L_r L_{\delta s} L_s)^2}} \quad (18)$$

#### 5 Crowbar 电阻值的优化选取

在考虑 Crowbar 电阻值的选取时, 为避免电阻取值过大, 电阻上的电压超过母线电压而通过反并联二极管产生钳位效应, 首先应对转子故障电流的峰值进行估算。

现有文献的分析对撬棒阻值的设计主要有两种方法, 文献[13]针对文中列举出的电机参数指出了撬棒阻值与转子电阻间的倍数关系, 但不同的电机中转子电阻值存在较大差异, 因此这种方法并不具有普遍性。文献[1]同样是基于转子电流峰值的估算, 给出了撬棒阻值的选取上限, 但在转子电流最大值估算时, 却又忽略了撬棒电阻阻值的影响。

通过前文推导的转子电流表达式, 考虑撬棒阻值对转子电流峰值的影响, 再据此作出相应化简。

全跌落故障下,感应出的转子侧反电势最高,转子故障电流的峰值也最大。考虑特征根取值,将转子电流表达式(14)进行简化:

$$i_r e^{j\theta} \approx \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{(1-k)U_{s0}}{R_{rc} - j\omega_r L_{\delta s}} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + \frac{\omega_2}{\omega_s} \cdot \frac{kU_{s0}}{R_{rc} + j\omega_2 L_{\delta s}} (e^{\lambda_2 t} - e^{j\omega_s t}) - i_{s0} e^{\lambda_2 t} \quad (19)$$

则在  $k=0$  时,Crowbar 电阻上的电压为:

$$U_r = \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{R_{cb}}{(R_{rc} - j\omega_r L_{\delta s}) e^{j\theta}} U_{s0} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) - \frac{R_{cb} i_{s0}}{e^{j\theta}} e^{\lambda_2 t} \quad (20)$$

转子电流将在  $e^{\lambda_1 t}$  与  $e^{\lambda_2 t}$  反向时达到峰值, $e^{\lambda_2 t}$  以转速频率旋转,因此峰值大约出现在半个转速频率旋转周期。

从式(20)分析可知,当  $R_{cb}$  大于或与  $\omega_r L_{\delta s}$  相当时,首项  $e^{\lambda_1 t}$  的幅值将会接近于  $U_s$ ,而通常情况下,双馈变频器的容量仅略大于转差容量,考虑一定的裕量,取直流母线电压的值为  $(0.4 \sim 0.5)U_s$  (经定转子匝比折算至定子侧),因此转子侧 Crowbar 电阻须远小于  $\omega_r L_{\delta s}$ 。

依据条件  $R_{rc} \ll \omega_r L_{\delta s}$ ,  $e^{\lambda_2 t}$  的衰减系数  $\lambda_2 \approx -R_{rc}/L_{\delta s} \gg -\omega_s = -100\pi$ ,取  $1/10$ ,经过半个基波周期衰减幅值仍大于  $e^{-0.01 \times 10\pi} = 0.73$ ,这也验证了 3.2 节中的分析,即在故障发生后第一个基波周期,快速衰减项的影响不可忽略,电流的峰值为两个分量幅值的叠加。

图 10 是全跌落下,根据式(19)以及本文电机参数推出的撬棒阻值与转子电流峰值的关系,横轴的取值范围为  $0 \sim \omega_r L_{\delta s}$ ,可以发现,在 Crowbar 电阻远小于  $\omega_r L_{\delta s}$  的约束条件下,撬棒阻值对转子电流峰值的影响较小。

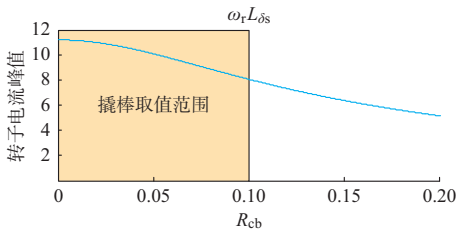


图 10 转子电流峰值与撬棒阻值关系

Fig.10 Relations between rotor peak current and Crowbar resistance

综合以上分析,转子电压幅值的简化表达式为:

$$U_r \approx \frac{L_s}{L_m} \frac{R_{cb}}{\omega_s L_{\delta s}} (1 + 0.73) U_s e^{-j\theta} \quad (21)$$

为避免转子线电压高于直流母线电压,  $U_{rline} <$

$U_{dc}$ ,得到 Crowbar 电阻的取值范围为:

$$R_{cb} < \frac{U_{dc}}{1 + 0.73} \omega_s L_{\delta s} \quad (22)$$

写成标么值形式:

$$R_{cb}^* < \frac{U_{dc}}{1.73} L_{\delta s}^* \quad (23)$$

依据式(23)绘出阻值与直流母线电压、漏感系数的关系曲线,通常情况下,双馈感应发电机定、转子漏感的标么值在  $0.1 \sim 0.3$  之间,如图 11 所示。

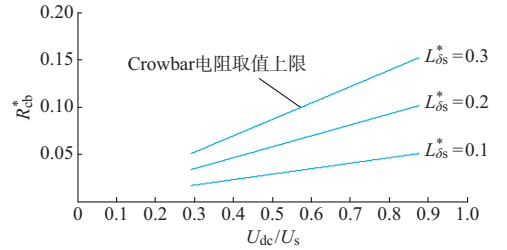


图 11 Crowbar 阻值与  $U_{dc}$  和漏感关系曲线  
Fig.11 Relations between Crowbar resistance and  $U_{dc}$ , leakage inductance

考虑 Crowbar 电阻对故障期间暂态特性的影响,对 Crowbar 阻值的选取原则进行优化:

1) 为避免转子侧过电流在 Crowbar 电阻上产生的过电压超过直流母线电压的值,Crowbar 阻值的上限应按照式(23)选取。

2) 较小的阻值能在故障发生初期为系统馈送更多的无功功率,但较大的阻值能减小故障下的定、转子冲击电流,保护双馈系统,同时减小端口功率的振荡,因此在 Crowbar 上电压不超过母线电压的条件下,阻值应尽量取大。

3) 考虑到电磁转矩在暂态过程中剧烈且快速的振荡变化,Crowbar 电阻的选取不可太小,以削弱电磁转矩振荡峰值,减小对双馈感应发电机机械系统的损伤。

## 6 结语

针对基于 Crowbar 保护式的 DFIG,推导了其在端口电压对称跌落情况下的定子磁链、定子电流、转子电流的解析表达式,该表达式能够准确反映定子磁链及定、转子电流与电压跌落深度、电机初始运行工况、Crowbar 阻值之间的关系,并能准确计算定、转子故障电流的幅值。

在此基础上,首先分析了定、转子电流各分量的组成及其物理意义,接着重点分析了 Crowbar 电阻

对定、转子电流幅值大小、衰减速度的影响,以及对故障期间端口功率、电磁转矩特性的影响,最后分析了电机初始运行工况对故障电流峰值大小的影响。

基于以上推导和分析,并结合常规 Crowbar 电阻的选取原则,推导出了较为准确的 Crowbar 阻值选取范围,提出了 Crowbar 阻值的优化选取方案,该方案需要综合考虑实际双馈感应发电机的机械与电气耐受能力,权衡转子侧过流过压、电磁转矩,以及对系统功率振荡之间的关系。

准确的短路电流估算有助于对电力系统故障进行准确的分析,为 DFIG 低电压穿越期间的暂态分析提供了可靠的基础,便于根据具体需要,从复杂的表达式中,依据实际参数进行适当简化,抽象出各个暂态量与 Crowbar 阻值、漏感大小、初始运行工况之间的影响关系。同时,所提出的 Crowbar 电阻选取公式,也清晰地揭示了阻值的范围,为实际工程中 Crowbar 电阻的选取提供了一定的参考。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 徐殿国,王伟,陈宁.基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J].中国电机工程学报,2010,30(22):29-36.  
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [2] 徐海亮.双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J].电力系统自动化,2013,37(20):8-15.  
XU Hailiang. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.
- [3] HANSEN A D, HANSEN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004)[J]. Wind Energy, 2007, 10(1): 81-97.
- [4] 胡书兵,贺益康.双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制[J].电力系统自动化,2008,32(2):49-52.  
HU Jiabing, HE Yikang. Low voltage ride through operation and control of doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 49-52.
- [5] DIPS L, SANCHIS J, ROBOAM P, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generation during three-phase voltage dips [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [6] 胡书举,李建林,许洪华.变速恒频风电系统应对电网故障的保护电路分析[J].变流技术与电力牵引,2008(1):45-50.  
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis on protection circuits suitable for VSCF-WECS to cope with grid faults[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2008(1): 45-50.
- [7] JOOS G. Wind turbine generator low voltage ride through requirements and solutions[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 7p.
- [8] 欧阳金鑫,熊小伏,张涵轶.电网短时并网双馈风电机组的特性研究[J].中国电机工程学报,2011,31(22):17-25.  
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [9] PETERSSON A. Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines[D]. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2005.
- [10] 李辉,赵猛,叶仁杰,等.电网故障下双馈风电机组暂态电流评估及分析[J].电机与控制学报,2010,14(8):45-51.  
LI Hui, ZHAO Meng, YE Renjie, et al. Evaluation and analysis of transient current of a DFIG wind generation system under grid fault [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 45-51.
- [11] MORREN J, HAAN S W H. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [12] MORREN J, HAAN 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.
- [13] 周宏林,杨耕.不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J].中国电机工程学报,2009,29(增刊1):184-191.  
ZHOU Honglin, YANG Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with Crowbar protection under different voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement 1): 184-191.
- [14] 张艳霞,童锐,赵杰,等.双馈风电机组暂态特性分析及低电压穿越方案[J].电力系统自动化,2013,37(6):7-11.  
ZHANG Yanxia, TONG Rui, ZHAO Jie, et al. Transient characteristics analysis and low voltage ride-through scheme of doubly-fed wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 7-11.
- [15] 张学广,徐殿国,李伟伟.双馈风力发电机三相短路电流分析[J].电机与控制学报,2008,12(5):493-497.  
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Analysis of three-phase short circuit current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 493-497.
- [16] ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis of DFIG-type WG with Crowbar protection under grid faults [C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'12), March 28-31, 2012, Hangzhou, China: 1072-1079.

熊 威(1989—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:双馈风力发电系统及其控制。E-mail: hbycwz@126.com



邹旭东(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向:电能  
存储与变换、新能源发电、电力电子与电力传动技术在电力  
系统中的应用。E-mail: xdzou@mail.hust.edu.cn

电子负载、双馈机组的低电压穿越技术。E-mail: dochuang  
@163.com

黄清军(1984—),男,博士研究生,主要研究方向:电力

(编辑 丁琰)

## Transient Analysis and Crowbar Design of Doubly-fed Induction Generator with Crowbar Protection Under Grid Voltage Dips

XIONG Wei, ZOU Xudong, HUANG Qingjun, LIANG Zongze, CHEN Jianqing, KANG Yong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** An incorporation of a Crowbar is still the main method for the doubly-fed induction generator (DFIG) in low-voltage ride through. Generally, the mutual coupling between the stator and rotor flux is ignored during the transient analysis of DFIG with Crowbars, but this approximation has brought about obvious errors and even left out some transient characteristics. Through an analysis of the process of low voltage ride through (LVRT) based on a detailed model of DFIG, accurate expressions for stator flux, stator current and rotor current are deduced. Thus the characteristic of these variables are analyzed and the values calculated. An actual 10 kW DFIG is used for case study, the simulation results proving the accuracy of the expressions. From these formulas, the relations between the values of Crowbar resistors and the pulsation amplitude of electromagnetic torque, output power are revealed. Taking into account the DC-link clamp effect and influence on the performance of DFIG during LVRT, a new Crowbar resistance design method is proposed for reference in relevant engineering projects.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215100), National Natural Science Foundation of China (No. 51477064) and Lite-on Power Electronics Technology Research Fund (No. 2013-04).

**Key words:** wind power generation; doubly-fed induction generator (DFIG); low voltage ride through (LVRT); Crowbar; short circuit current; transient analysis