计及定子励磁电流变化的永磁双馈发电机零转矩控制策略

刁统山,王秀和
山东大学电气工程学院 济南 250061

摘要 为了提高电网电压严重骤降故障下双馈发电机低压穿越性能，研究了新型永磁双馈发电机的低电压穿越控制策略。对新型永磁双馈风力发电机结构及电磁关系进行了分析，建立了永磁双馈发电机系统的动态数学模型，针对永磁双馈发电机在电网电压严重跌落时，提出了计及定子励磁电流变化的永磁双馈发电机零转矩控制策略，分别采用传统 Crowbar 控制和计及定子励磁电流变化的零转矩控制策略进行了对比仿真。仿真结果表明，计及定子励磁电流变化的零转矩控制策略能够改善永磁双馈发电机低压穿越运行能力。

关键词：风力发电 永磁双馈发电机 零转矩控制 Crowbar 控制 低电压穿越
中图分类号：TM315

Zero Torque Control Strategy for Permanent Magnet Doubly Fed Induction Generators Considering Stator Excitation Current Change

Diao Tongshan,Wang Xiuhe
Shandong University Jinan 250061 China

Abstract A new control strategy for rotor-side converter of a novel permanent magnet doubly-fed induction generator(PMDFIG) is discussed. The new control strategy can enhance the low voltage ride-through(LVRT) capability. By the analysis of structure and electromagnetic relations, the mathematical model of PMDFIG based on the rotating coordinate system is established. The zero torque control scheme considering stator excitation current change is introduced when low voltage occurs due to grid fault. The effectiveness of the proposed control strategy is demonstrated by two simulation cases. Compared with the conventional crowbar protection, the proposed control method can effectively improve the LVRT capability of the PMDFIG during the grid serious faults.

Keywords: Wind power generation, permanent magnetic doubly fed induction generator (PMDFIG), zero torque control, Crowbar control, low voltage ride-through

1 引言

近年来，随着风力发电技术的发展，风力发电机的容量迅速增大。永磁式直驱风力发电机组采用永磁体建立磁场，无需外部提供励磁电源，提高了效率和工作可靠性，并具有较好的低电压穿越能力，但需要全功率变换器实现恒频恒压输出，且电机体积大、制造成本高。双馈型风力发电机（DFIG）使用变流器进行励磁，具有变速恒频运行的特点，但需要电网提供无功电流，且低电压穿越能力较差[1-3]。

随着风力发电在电网中所占比重的增大，提高发电机在电网严重跌落故障的情况下不间断运行的能力，显得越来越重要。本文在笼型永磁感应发电机研究的基础上[4-6]，结合永磁发电机与双馈发电机的优点，提出了一种新结构的发电机，即永磁双馈发电（Permanent Magnetic Doubly Fed Induction Generator, PMDFIG）。该电机的定子与常规感应电机相同，但有两个转子：一个是绕线式外转子；一

基金：国家自然科学基金资助项目 (51177089)。
收稿日期 2013-06-04 改稿日期 2013-09-24
作者简介：刁统山 男，1975 年生，博士研究生，讲师，研究方向为永磁风力发电机系统及其控制。 王秀和 男，1967 年生，教授，博士生导师，研究方向为永磁电机及其控制。

个是可自由旋转的永磁式内转子。提出的永磁双馈发电机由于永磁转子的存在，与普通双馈发电机相比，可以减小励磁电流，提高电机功率密度和效率。该电机是将笼型永磁感应发电机的笼型转子变为绕线式转子，并对电机实行双馈式控制。 PMDFIG 转子结构示意图如图 1 所示。

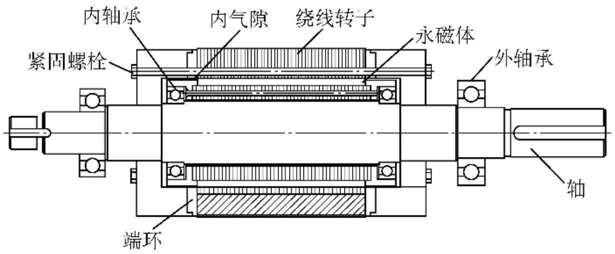


图 1　永磁双馈发电机转子结构示意图

Fig.1　Schematic rotor diagram of the PMDFIG

在普通双馈电机低电压穿越运行的研究中，主要有以下几种方法应对电网电压严重骤降故障，文献[7,8]采用 Crowbar 控制方式。Crowbar 控制即通常意义上的转子短路保护技术，目的在于当检测到电网系统出现电压跌落时，立刻投入转子回路旁路保护装置，为转子侧电路提供旁路，达到限制通过励磁变流器的电流和转子绕组过电压的作用，以此来维持双馈电机不脱网运行。文献 [9,10]提出了一种适用于双馈风力发电机电网电压定向矢量控制的灭磁控制方法。由于风电机组定子电阻很小，定子磁链的暂态分量衰减速度较慢，要采取相应的措施来加快定子侧磁链直流分量的衰减。因此可以在转子侧变换器采取相应的控制策略来对定子磁链的直流分量进行灭磁控制，来减小电网电压突变对机组产生的负面影响。文献 [11]提出了一种基于能量控制的策略，该策略在电网电压骤降时通过限制电机电磁转矩的方式，减少故障期间风能转化为电能，抑制电网电压骤降期间双馈电机的过电流。

本文从永磁双馈发电机的结构特点出发，构建该发电机系统的动态模型。提出了永磁双馈发电机计及定子励磁电流变化的零转矩控制策略，依据低电压运行标准， 在电网三相完全短路以及电网电压骤降为 0.15pu 两种严重故障的情况下 ，对永磁双馈发电机系统进行了 Crowbar 控制和计及定子励磁电流变化的零转矩控制方式的对比仿真分析。仿真验证了零转矩控制结合 计及定子励磁电流变化 的矢量控制方式具有更好的控制效果。

2　永磁双馈风力发电系统的动态模型

永磁双馈电机的内转子为永磁转子，外转子为绕线式转子。电机运行时，由风机拖动绕线转子转动，定子中将感应出同步旋转的磁场。旋转磁场将拖动永磁转子同步旋转。从电机的运行原理看，相当于在普通双馈电机的基础上，增加了内部同步速旋转的永磁磁场。

为了分析方便，做如下假定：电机各相绕组对称，磁路线性，不计饱和影响，忽略齿槽影响，不计铁心损耗。取定子各电磁量的正方向符合发电机法则，转子各电磁量的正方向符合电动机法则，采用 dq0 坐标系。由以上分析，永磁双馈电机仅仅是在转子内增加一个同步旋转的永磁转子，即从数学模型的角度来看，其电压方程应该与普通双馈电机电压方程一致。则永磁双馈发电机的电压矢量方程为

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}} = -R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}} + p\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}} + \mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}} \\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{r}} = R_{\mathrm{r}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} + p\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}} + \mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}\end{cases} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}}$，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{r}}$——定转子电压矢量；

$\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}$，$\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}$——定转子电流矢量；

R_{s}，R_{r}——定转子电阻；

$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}$，$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}$——定转子磁链矢量；

p——微分算子，$p=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$；

ω_{s1}——滑差电角度，$\omega_{\mathrm{s1}}=\omega_{\mathrm{s}}-\omega_{\mathrm{r}}$；

其中　ω_{s}，ω_{r}——同步角速度和转子角速度。

永磁双馈电机的内转子是个永磁同步转子，其外转子为绕线异步转子。内部的永磁同步转子，相当于在外气隙中增加了一个同步速的磁链，电机的主磁链绝大部分将穿过绕线转子，进入定子轭部，这一现象在永磁双馈电机电磁场有限元计算中也得到了验证，如图 2 所示。永磁转子产生的磁通在 定

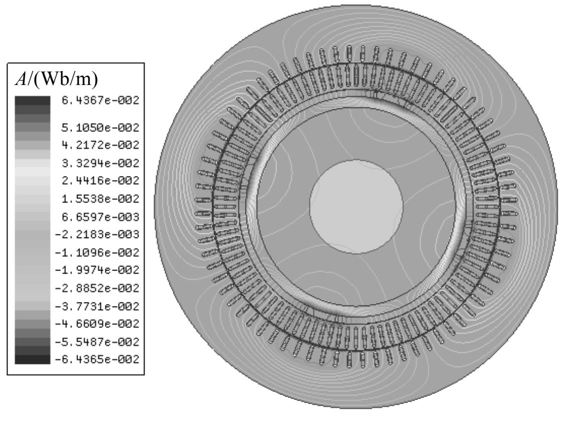


图 2　永磁双馈电机磁力线分布图

Fig.2　Flux distribution of PMDFIG

转子中有漏磁，根据有限元的计算，该部分漏磁很小，在工程上是可以忽略的。这种忽略 绕线转子中的漏磁建立起来的数学模型得到了简化，有利于电机模型的建立和简化电机的控制。因此，在考虑数学模型时，本文建立的 定转子绕组 磁链方程 采用相同的永磁磁链。

忽略永磁转子 漏磁建立的永磁双馈电机磁链矢量方程式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}=-L_{\mathrm{s}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}+L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}+\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{f}}\\ \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}=-L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}+L_{\mathrm{r}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}+\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{f}}\end{cases}\tag{2}$$

式中　L_{s}——定子全自感；

L_{m}——定转子之间的互感；

L_{r}——转子全自感；

$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{f}}$——永磁磁链。

定义等效定子励磁电流 i_{mo} 为

$$i_{\mathrm{mo}}=\frac{\psi_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{m}}}=\frac{L_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{m}}}i_{\mathrm{s}}+i_{\mathrm{r}}\tag{3}$$

$L_{\mathrm{m}}/L_{\mathrm{s}}\approx 1$，由式（2）和式（3）可得转子磁链为

$$\psi_{\mathrm{r}}=-\psi_{\mathrm{s}}+\left(\frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}-L_{\mathrm{r}}\right)i_{\mathrm{r}}+\psi_{\mathrm{f}}$$

$$=-\frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}i_{\mathrm{mo}}+\left(L_{\mathrm{r}}+\frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\right)i_{\mathrm{r}}+2\psi_{\mathrm{f}}\tag{4}$$

将式（3）和式（4）代入式（1）得

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}}=-R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}+L_{\mathrm{m}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{mo}}}{\mathrm{d}t}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}\\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{r}}=R_{\mathrm{r}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}-\dfrac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{mo}}}{\mathrm{d}t}+\left(L_{\mathrm{r}}+\dfrac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\right)\dfrac{\mathrm{d}i_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}\end{cases}\tag{5}$$

由式（5）可得

$$\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{mo}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{L_{\mathrm{m}}}(u_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{s}}-\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}\psi_{\mathrm{s}})\tag{6}$$

将式（6）代入式（5）中，可得转子电压方程为

$$u_{\mathrm{r}}=\left(L_{\mathrm{r}}+\frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\right)\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}+\left[R_{\mathrm{r}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}}\left(\frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}-L_{\mathrm{r}}\right)\right]i_{\mathrm{r}}-$$

$$\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}}\psi_{\mathrm{s}}-(u_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{s}}-\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s}}\psi_{\mathrm{s}})+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{s1}}\psi_{\mathrm{f}}\tag{7}$$

永磁双馈电机采用基于定子电压定向的矢量控制策略，d 轴电压等于电网电压，即 $u_{\mathrm{sd}}=u_{\mathrm{s}}$，则定子 q 轴电压为零，即 $u_{\mathrm{sq}}=0$。式（7）可以整理为

$$\begin{cases}u_{\mathrm{dr}}=R_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{dr}}+\left(L_{\mathrm{r}}+\dfrac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\right)pi_{\mathrm{dr}}+\Delta u_{\mathrm{dr}}+\Delta u'_{\mathrm{dr}}\\ u_{\mathrm{qr}}=R_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{qr}}+\left(L_{\mathrm{r}}+\dfrac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}\right)pi_{\mathrm{qr}}+\Delta u_{\mathrm{qr}}+\Delta u'_{\mathrm{qr}}\end{cases}\tag{8}$$

式中

$$\begin{cases}\Delta u'_{\mathrm{dr}}=-u_{\mathrm{s}}+R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{sd}}-\omega_{\mathrm{s}}\psi_{\mathrm{sq}}\\ \Delta u'_{\mathrm{qr}}=-R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{sq}}-\omega_{\mathrm{s}}\psi_{\mathrm{sd}}\end{cases}\tag{9}$$

永磁双馈电机的电磁转矩为

$$T_{\mathrm{em}}=\frac{3}{2}p(i_{\mathrm{dr}}\psi_{\mathrm{qr}}-i_{\mathrm{qr}}\psi_{\mathrm{dr}})\tag{10}$$

绕线转子的转矩平衡方程为

$$T_{\mathrm{L}}-T_{\mathrm{em}}=J\frac{\mathrm{d}\Omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}\tag{11}$$

式中　J——电机转子的转动惯量；

Ω_{r}——电机转子的机械角速度；

T_{L}——发电机的驱动转矩，该转矩可通过变桨距控制进行调节。

当电网电压恒定时，电机定子电压和定子磁链恒定，定子电流的励磁分量也不变， $\mathrm{d}i_{\mathrm{mo}}/\mathrm{d}t=0$。当电网发生故障时，电压 u_{s} 和磁链 ψ_{s} 是变化的，定子电流的励磁分量也发生变化， $\mathrm{d}i_{\mathrm{mo}}/\mathrm{d}t\neq 0$。上述模型计及定子励磁电流的变化，可以减小故障期间转子电流的波动，防止故障时发电机转子及转子侧变换器的过电流。式（1）、式（2）、式（8）、式（10）和式（11）构成了永磁双馈发电系统的动态模型。

3　电网严重故障状态下永磁双馈风力发电系统低电压穿越控制策略

上述计及定子励磁电流变化的永磁双馈发电机动态模型在电网电压小幅骤降情况下可以获得较好的控制效果。但是，电网电压大幅跌落情况下，必须采取相应的保护措施。

电网电压严重跌落情况下，永磁双馈发电机也可采用普通双馈发电机中采用的 Crowbar 控制，图 3 为 PMDFIG 的 Crowbar 控制原理。虚线框中部分为 Crowbar 控制电路。当电网电压骤降而引起转子

侧电流增大时，晶闸管导通，同时转子侧变换器停止工作。绕线转子三相短接，从而抑制转子电流的冲击。Crowbar 控制在应对电网电压骤降故障时具有非常好的效果，但增加了硬件成本，也增加了整个装置的体积、重量；同时，Crowbar 旁路电阻的选取、旁路电阻接入和切除的时间控制等问题都没有得到很好解决。

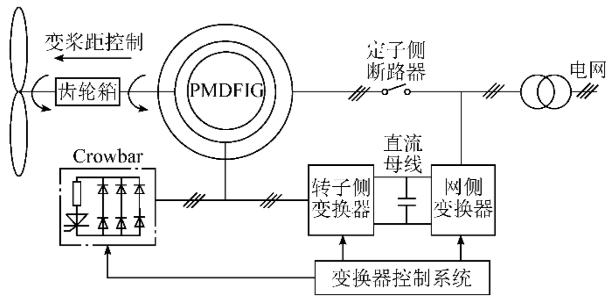


图 3　永磁双馈风力发电系统 Crowbar 控制

Fig.3　Crowbar control diagram of the PMDFIG wind energy generation system

为了降低发电系统的成本，又能提高低电压穿越能力，永磁双馈发电机在电网电压严重跌落时，在计及定子励磁电流变化的矢量控制策略基础上，提出了零转矩控制策略，变换器控制系统通过限制发电机转矩的方式控制发电机转子加速运行，将由电网电压骤降引起的风电机组中的不平衡能量转换成转子的动能，从而减小发电机定、转子回路中的过电流，这种控制方式能够将电网电压严重骤降时产生的能量转化为电机转子的旋转储能，而在电网电压故障解除后，将此部分能量转变为电能输出。从而有利于电网电压的快速恢复，满足低电压穿越运行要求。

在电网电压正常和电网电压恢复正常的过程中，采用计及定子励磁电流变化的定子电压定向矢量控制。变换器控制系统通过给定电机输出有功功率与无功功率，对二者进行 PI 调节控制，从而实现对发电系统的有功功率与功率因数的控制。PMDFIG 在电压严重跌落时计及定子励磁电流变化的零转矩控制原理如图 4 所示。当检测系统检测到电网电压严重跌落时，变换器控制系统将发电机的输入转矩强制为零，从而把来自风力系统的能量转化为转子的旋转动能，当电网故障解除时，再将旋转储能回馈到系统中。

网侧变换器的控制采用常规的矢量控制方式，网侧变换器控制框图如图 5 所示[12,13]。采用电压外环和电流内环控制，电压外环主要作用是控制整流器直流侧电压稳定，而电流内环的主要作用是按电压外环输出的电流指令进行电流控制。

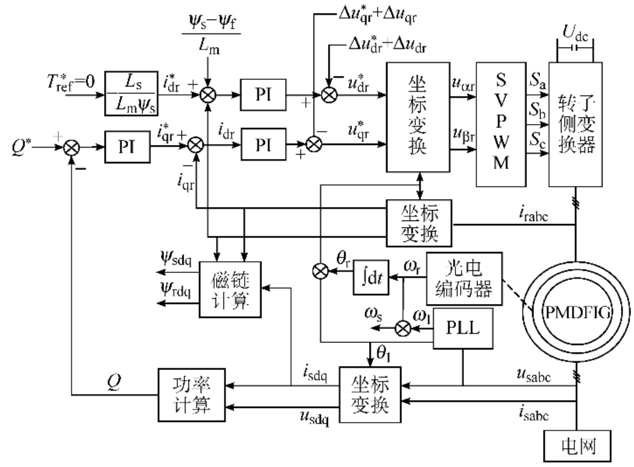


图 4　计及定子励磁电流变化的零转矩控制框图

Fig.4　Diagram of zero torque control strategy considering stator excitation current

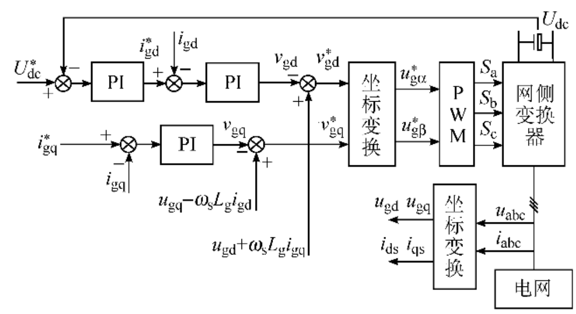


图 5　网侧变换器控制框图

Fig.5　Control diagram of the grid side converter

4　永磁双馈发电机低电压穿越仿真分析

为了验证新型永磁双馈风力发电机在 Crowbar 控制和计及定子励磁电流变化的零转矩控制策略的有效性，依据低电压穿越运行标准，分别研究了永磁双馈风力发电系统在电网三相完全短路以及电网电压骤降为 0.15pu 两种严重故障情况下低电压穿越能力。

4.1　低电压穿越运行标准

图 6 为爱尔兰在 2004 年公布的电网规范。其中规定当网侧电压在实线以上范围内时，风力发电机必须维持与电网的连接。当电网三相完全短路时，要求发电机保持与电网连接时间持续为 125ms；当

电网三相电压由 1.0pu 跌落至 0.15pu 时，要求发电机保持与电网连接时间持续为 625ms。当电网电压恢复时，要求发电机必须在 1s 内快速恢复到正常的工作电压[14-16]。

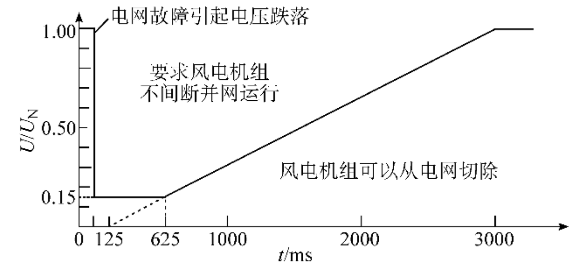


图 6　低电压穿越运行标准

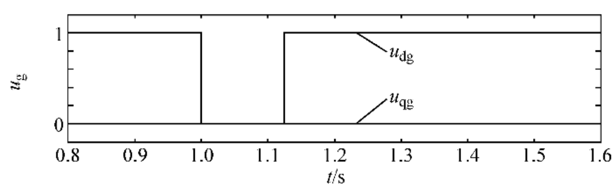
Fig.6　Ride through standard of wind power generator

4.2　电网三相完全短路故障低电压穿越运行仿真

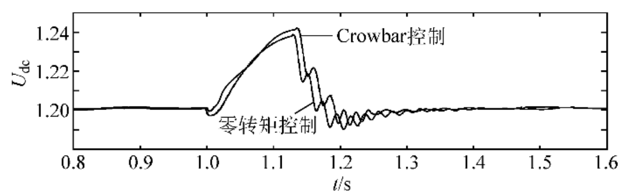
为了验证永磁双馈发电机 Crowbar 控制和零转矩控制策略的有效性，建立了电网电压骤降故障情况下 PMDFIG 的仿真模型，PMDFIG 仿真参数是根据实际设计的 1.5MW 电机的有限元分析得到的，仿真具体参数如下：额定功率 1.5MW,定子额定电压 690V，额定频率 50Hz，机组惯性常数 0.94s，定子电阻 0.01pu（图 7、图 8 均为标幺值），转子电阻 0.009pu，定子漏感 0.171pu,转子漏感 0.156pu，定转子互感 2.9pu，极对数 3，定转子匝数比为 0.38，永磁磁链 0.5pu，Crowbar 旁路电阻 0.8pu。

仿真模型中，电网故障期间转子侧变换器分别采用提出的零转矩控制方式和传统的 Crowbar 控制方式进行对比，以验证零转矩控制方式的有效性。

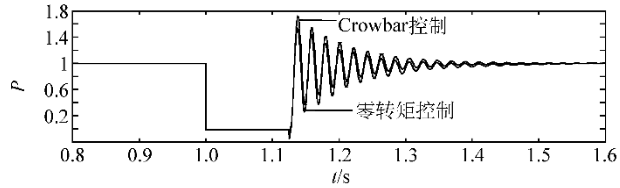
电网三相完全短路故障时，零转矩控制方式与 Crowbar 控制方式仿真对比结果如图 7 所示。电机稳定运行时的转速为 1.2pu。图 7a 中，1s 时发生三相完全短路故障，电网电压由 1pu 变为 0；1.125s 时，电网电压恢复正常。



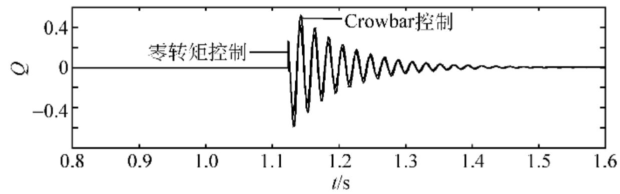
（a）电网 dq 轴电压



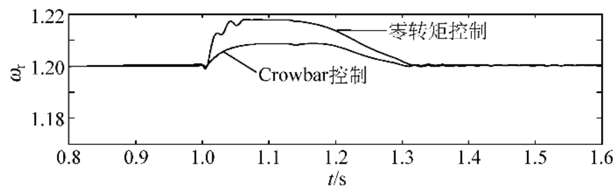
（b）直流母线电压



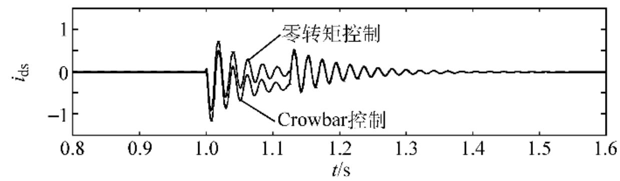
（c）定子有功功率



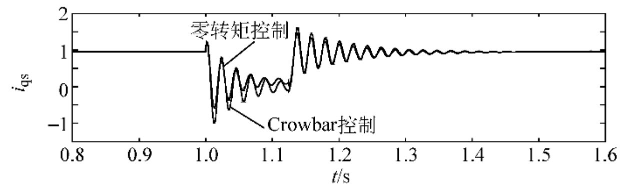
（d）定子无功功率



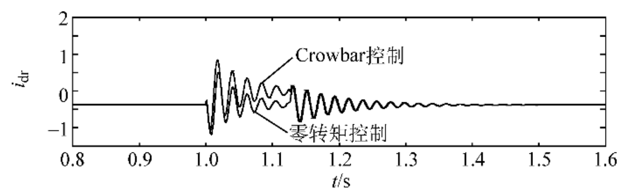
（e）电机转速



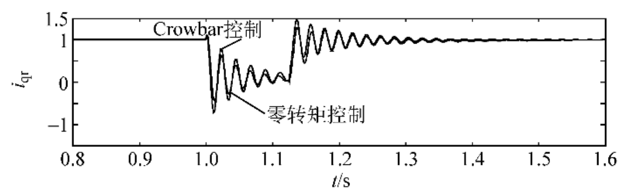
（f）定子 d 轴电流



（g）定子 q 轴电流



（h）转子 d 轴电流



（i）转子 q 轴电流

图 7　电网三相短路时零转矩控制方式与 Crowbar 控制方式仿真对比

Fig.7　Comparison of the responses between the traditional Crowbar and the zero-torque control under three phase short circuit

图 7b 为直流母线电压波形，可以看到网侧变换器采用传统的矢量控制方式，能够有效的抑制直流母线电压的波动。在常规的 Crowbar 控制方式中，母线电压可以升高到 1.242pu，而本文所采用的方法，可以将直流母线电压的波动限制在 1.235pu 内。

由图 7c、7d 可以看出，零转矩控制方式能够有效的抑制有功功率与无功功率的波动，同时保证有功功率与无功功率维持在给定值附近。在抑制波动方面，其性能也优于 Crowbar 控制。

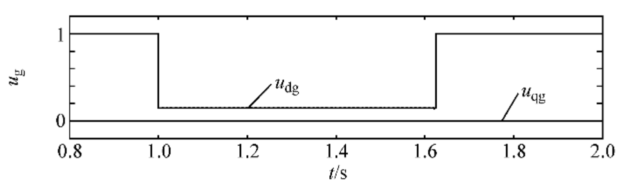
由图 7e 可以看出，采用零转矩控制方式，在电网电压严重骤降的情况下，其转子转速波动大于 Crowbar 控制。这正是零转矩控制思想的核心体现。零转矩控制即是将电网电压骤降瞬间的电机能量转化为电机转子的动能，因此其转子转速上升必然大于 Crowbar 控制。由图中可以看到，零转矩控制时，转子转速上升峰值为 1.218pu。

由图 7f、7g 可以看出，零转矩控制方式可以减小电压骤降时的定子电流，定子电流值要小于 Crowbar 控制方式时的电流值，从而能够有效的抑制定子电流对电网的冲击。

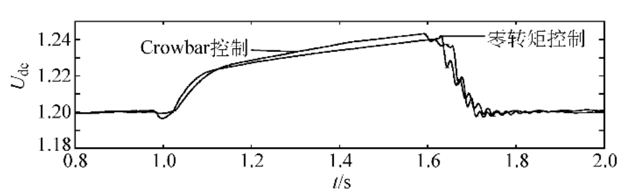
由图 7h、7i 可以看出零转矩控制可以有效控制电压严重骤降时转子电流波动，其电流小于 Crowbar控制方式的冲击电流，这在实际运行时能够有效防止故障时转子侧变换器过电流。

4.3　长时间电压跌落低电压穿越运行仿真

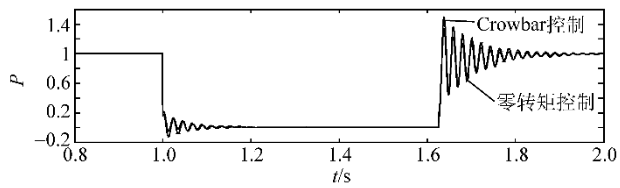
电网电压长时间跌落故障时，零转矩控制方式与 Crowbar 控制方式仿真对比结果如图 8 所示，曲线 1、2 分别对应 Crowbar 控制方式和零转矩控制方式。电机稳定运行时的转速为 1.2pu。图 8a 中，1s 时，电网电压由 1pu 降为 0.15pu；1.625s 时，电网电压恢复正常。



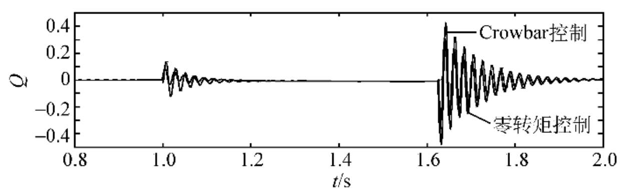
（a）电网 dq 轴电压



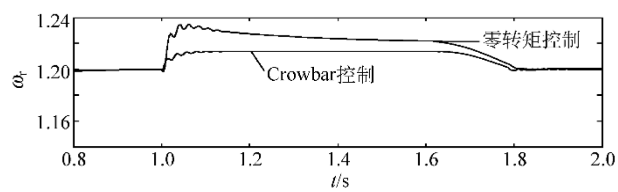
（b）直流母线电压



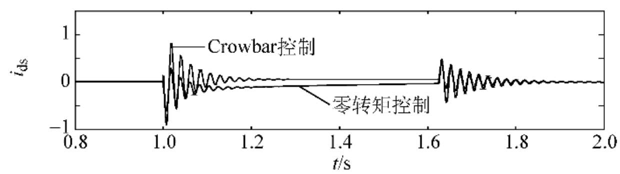
（c）定子有功功率



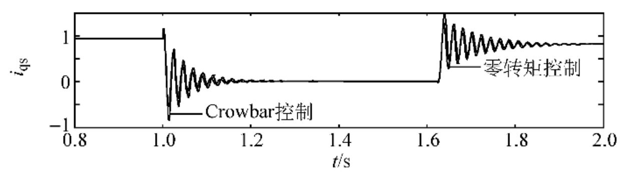
（d）定子无功功率



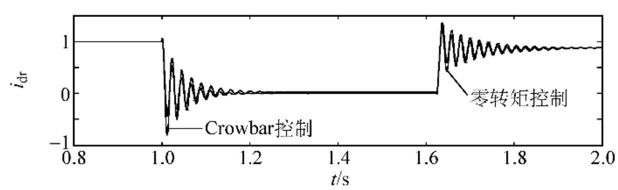
（e）电机转速



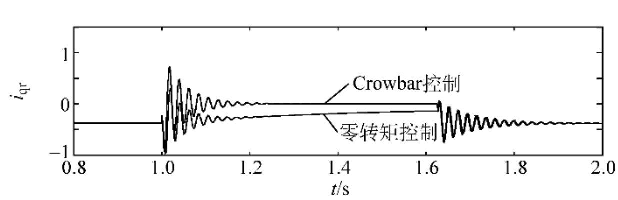
（f）定子 d 轴电流



（g）定子 q 轴电流



（h）转子 d 轴电流



（i）转子 q 轴电流

图 8　电网电压跌落时零转矩控制方式与 Crowbar 控制方式仿真对比

Fig.8　Comparison of the responses between the traditional Crowbar and the zero-torque control under grid voltage dip fault

由图 8 所示，计及定子励磁电流变化的零转矩控制在较长时间的电压跌落故障中也能够达到较好的控制效果。与 Crowbar 控制方式相比较，能够有效地抑制有功功率与无功功率的振荡，在抑制定转子冲击电流方面也要优于 Crowbar 控制。缺点就是造成电机转子较大的转速波动，如图 8e 所示，电机转速峰值达到 1.238pu。当电机转速上升超过设定值时，可以采用变桨距控制，增大桨叶节距角，减少桨叶提供给电机的机械功率，减缓转速的上升。

对永磁双馈风力发电机动态性能仿真表明，提出的新型永磁双馈发电系统在两种严重跌落故障的情况下，计及定子励磁电流变化的零转矩控制方式比常规的 Crowbar 控制具有较好的动态响应。

5　结论

计及定子励磁电流的零转矩控制方式 在电网电压严重骤降故障时，将发电机系统的能量转化为电机转子的旋转储能，从而抑制定转子电流的冲击，有效的保护电机和转子侧变换器。同时该种控制方式应用于新型永磁双馈风力发电机，并不需要增加 Crowbar 控制电路，从而节约了成本，减小了发电系统重量和体积。本文通过零转矩控制与 Crowbar 控制的对比仿真，证明零转矩控制方式能够有效控制永磁双馈发电机过电流，提高了永磁双馈发电机系统的低电压穿越能力。

故障期间采用零转矩控制将会带来转子转速的上升，但这可以通过变桨距控制进行调节，减小风机功率的输入从而有效的抑制电机转速的上升。同时，考虑到电网电压严重骤降持续的时间都比较短，所以对风力发电机械系统的影响不大。

参考文献

[1] 贺益康，胡家兵, Lie XU. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京：中国电力出版社 , 2012.

[2] 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.
He Yikang, Hu Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.

[3] 刘其辉，谢孟丽．双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略 [J]. 电工技术学报 , 2012, 27(10): 60-67.
Liu Qihui, Xie Mengli. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-67.

[4] Toshihiro Tsuda, Tadashi Fukami, Yasunori Kanamaru, et al. Effects of the built-in permanent magnet rotor on the equivalent circuit parameters of a permanent magnet induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 798-799.

[5] Tadashi Fukami, Kenichi Nakagawa, Yasunori Kanamaru, et al. A technique for the steady-state analysis of a grid-connected permanent-magnet induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 318-324.

[6] Toshihiro Tsuda, Tadashi Fukami, Yasunori Kanamaru, et al. Performance analysis of the permanent-magnet induction generator under unbalanced grid voltages[J]. Electrical Engineering in Japan, 2007, 161(4): 60-69.

[7] 张学广，　徐殿国．　电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制．电机与控制学报 [J], 2009, 13(1): 99-104.
Zhang Xueguang, Xu Dianguo. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 99-104.

[8] 蔚兰，陈国呈，曹大鹏，等. 双馈感应风力发电机网侧变换器低电压穿越控制策略 [J]. 电工技术学报 , 2011, 6(7): 37-43.
Yu Lan, Chen Guocheng, Cao Dapeng, et al. Low voltage ride through control strategy of grid side converter for double-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 37-43.

[9] 梁晖，石威威．风力发电系统多重化升压斩波器瞬时电流控制 [J]. 电工技术学报 , 2011, 26(4): 86-92.
Liang Hui, Shi Weiwei. Study of instantaneous current control for multiple boost converter in wind energy conversion system[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 86-92.

[10] 苏平，张靠社．基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]．电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-171.
Su Ping, Zhang Kaoshe. Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT Crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 164-171.

[11] Lihui Yang, Zhao Xu, Jacob Østergaard, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 27(2): 713-721.

[12] 姜传．提高双馈型风电机组低电压穿越能力的研究[D]．北京：华北电力大学, 2011.

[13] 刁统山，王秀和，魏蓓．永磁双馈风力发电机并网控制策略[J]．电网技术, 2013, 37(8): 2278-2283.
Diao Tongshan, Wang Xiuhe, Wei Bei. A grid-connection control strategy of permanent magnet doubly fed Induction wind power generator[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2278-2283.

[14] 蒋雪冬，赵航．应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]．电网技术，2008, 32(12): 84-89.
Jiang Xuedong, Zhao Hang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dips[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 84-89.

[15] 郭家虎，张鲁华，蔡旭．双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护[J]．电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-44, 48.
Guo Jiahu, Zhang Luhua, Cai Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-44, 48.

[16] 李戈，宋新甫，常喜强．直驱永磁风力发电系统低电压穿越改进控制策略研究[J]．电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 74-78, 83.
Li Ge, Song Xinfu, Chang Xiqiang. Improved control theory for low voltage ride-through of permanent mangnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 74-78, 83.