DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.141　　**中图分类号**：TM614　　**文献标志码**：A

双馈风力发电机故障穿越关键技术综述

凌　禹(中国电源学会会员)
(山西大同大学电气工程系，大同 037003)

摘要：随着风力发电机并网运行容量的增加，其故障穿越关键技术的研究越显紧迫。双馈风力发电机是风电市场主流机型之一，因此，科研人员对双馈风力发电机故障穿越关键技术进行了大量研究。对故障穿越技术研究的现状进行综述，从简单介绍双馈风力发电机的基本理论入手，先后介绍双馈风力发电机故障穿越机理分析现状及双馈风力发电机故障穿越不同方法的优缺点并进行分类和总结，最后，对双馈风力发电机故障穿越分析和技术进行总结和展望。

关键词：风力发电；双馈感应电机；故障穿越；保护

Review of Key Technologies for Fault Ride Through of DFIG-based Wind Turbine

LING Yu, *Member*, *CPSS*
(Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: With the increasing grid-connected operation capacity of wind turbines, the research on key technologies for their fault ride through (FRT) is becoming more and more urgent. Since the wind turbine with a doubly-fed induction generator (DFIG) is one of the dominant types on the wind power market, researchers have extensively studied the key technologies for the FRT capability of DFIG-based wind turbines. The status quo of researches on the related FRT technologies is reviewed. First, the basic theory of DFIG-based wind turbines is introduced. Then, the analysis methods for the FRT mechanism at present are summed up, and the advantages and disadvantages of different FRT solutions are classified. Finally, the analysis methods and technologies for the FRT of DFIG-based wind turbines are forecasted and summarized.

Keywords: Wind power generation; doubly-fed induction generator (DFIG); fault ride through (FRT); protection

风力发电是1种环境友好型可再生电力供应源，但风力发电大规模接入电网运行将会给电力系统安全稳定带来挑战[1-2]。在电网电压故障时，如果发生大面积的风力发电机跳闸，必将危及电力系统安全运行，甚至可能进一步导致电网崩溃[3]。故电力系统新规范要求并网风力发电机应保证具有故障穿越FRT(fault ride through)能力。所谓FRT是指风力发电机能保证在遭受规定的电力系统电压故障时不脱网运行。严格地讲，其包含低电压、高电压、零电压和不对称电压等故障穿越，即所谓全电压故障穿越。德国最早对风电机组提出低压穿越要求，随后欧洲各国也相继提出类似要求。此外，德国、澳大利亚等国家还提出了高压穿越和零压穿越的要求[4]。我国目前仅对低压穿越提出了要求，要求在 20%的机端电压条件下实现不脱网运行且持续时间不低于625 ms，同时能承受长期2%的电压不平衡和短时4%的电压不平衡，以及4%的并网电压谐波畸变，并能向电网提供无功电流[4]。

在变速风力发电机中，双馈感应电机 DFIG (doubly-fed induction generator)一直占据着国内外

收稿日期：2022-10-07；**修回日期**：2022-11-20，2022-12-18；
录用日期：2023-01-19；**网络首发日期**：2023-02-27
基金项目：大同市重点研发计划资助项目(2020015)
This work is supported by Datong Key R&D Plan under the grant 2020015

风电主流市场较大份额，主要原因是其具有成本低、功率变换器容量小、有功无功可控及运行性能良好等优点[5]。然而，DFIG 的 FRT 问题的解决最具挑战性，其根源在于 DFIG 定子绕组直接接电网导致其对电压故障具有敏感性，转子侧功率变换器容量小，且电流控制能力较弱[3]。

为了提高 DFIG 的 FRT 能力，科研人员从不同角度对这一问题开展了大量研究，有大量的公开文献报道。本文基于近期公开的文献报道，对双馈风力发电机故障穿越关键技术分 2 个方面进行了综述：其一是故障穿越机理分析；其二是故障穿越方法。通过对上述领域研究现状的详细梳理，给出了各种方法的优缺点并进行了分类，最后给出了详细的结论并指出了进一步的研究方向，为广大科研工作者提供参考。

1 双馈风力发电机故障穿越机理分析现状

1.1 双馈风力发电机结构及控制

双馈风力发电机是实现风力发电变速恒频运行的主流机型之一，其结构如图 1 所示。主要器件有风轮、齿轮箱、双馈发电机、转子侧变换器 RSC (rotor-side converter)、网侧变换器 GSC(grid-side converter)和变压器等[4]。图中：u_s 和 i_s 分别为双馈感应电机定子电压和电流；u_r 和 i_r 分别为双馈感应电机转子电压和电流；u_f 和 i_f 分别为网侧滤波器电

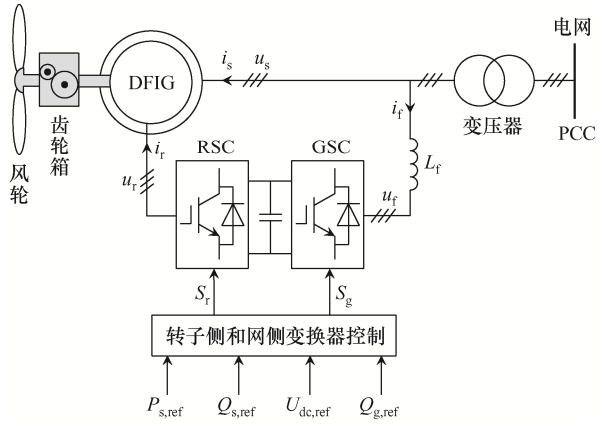


图 1 双馈风力发电机结构

Fig. 1 Structure of DFIG-based wind turbine

压和电流；$P_{s,ref}$ 和 $Q_{s,ref}$ 分别为定子有功和无功指令；L_f 为滤波电感；$U_{dc,ref}$ 为直流母线电压指令；$Q_{g,ref}$ 为网侧无功功率指令；S_r 和 S_g 分别为转子侧变换器和网侧变换器开关信号。

在正常的电网条件下，双馈风力发电机 RSC 主要负责独立控制定子有功和无功；而 GSC 主要任务是实现 GSC 和电网之间的有功和无功独立控制，以确保直流母线电压的规定范围和实现单位功率因数运行[6]。

1.2 双馈发电机瞬态模型及其瞬态行为分析

目前，专门研究用于 DFIG 故障穿越分析的数学模型的文献并不多。文献[7]是较早研究该内容的文献之一；文献[8]讨论了 1 种仅针对短时不对称电压故障时 DFIG 故障穿越分析模型。在大多数研究 DFIG 故障穿越瞬态行为的文献中，常用的 DFIG 瞬态模型是 4 阶动态数学模型[9]。忽略 DFIG 铁心损耗，依据电动机惯例，两相 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的 DFIG 4 阶动态数学模型的空间矢量表征方程[10]为

$$\boldsymbol{u}_s = R_s\boldsymbol{i}_s + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_s}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{u}_r = R_r\boldsymbol{i}_r + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_r}{\mathrm{d}t} - \mathrm{j}\omega_r\boldsymbol{\psi}_r \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s\boldsymbol{i}_s + L_m\boldsymbol{i}_r \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m\boldsymbol{i}_s + L_r\boldsymbol{i}_r \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{u}_s$、$\boldsymbol{i}_s$ 和 $\boldsymbol{\psi}_s$ 分别为定子电压、电流和磁链空间矢量；$\boldsymbol{u}_r$、$\boldsymbol{i}_r$ 和 $\boldsymbol{\psi}_r$ 分别为转子电压、电流和磁链空间矢量；R_s 和 L_s 分别为定子电阻和电感；R_r 和 L_r 分别为转子电阻和电感；ω_r 为转子电角速度；L_m 为互感。

根据式(1)~式(4)，合并整理可得基于转子侧瞬态的 DFIG 动态方程为

$$\begin{cases} \sigma L_r\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_r}{\mathrm{d}t} = -R_r\boldsymbol{i}_r + \mathrm{j}\omega_r\sigma L_r\boldsymbol{i}_r - \boldsymbol{E}_b + \boldsymbol{u}_r \\ \sigma = 1 - \dfrac{L_m^2}{L_sL_r} \\ \boldsymbol{E}_b = \boldsymbol{u}_{ro} = \dfrac{L_m}{L_s}\left(\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_s}{\mathrm{d}t} - \mathrm{j}\omega_r\boldsymbol{\psi}_s\right) \end{cases} \tag{5}$$

式中：σ 为总漏磁系数；$\boldsymbol{E}_b$ 为在转子回路中感应的反电动势，反映定子动态对转子电流的影响；$\boldsymbol{u}_{ro}$

为转子开路电压。

根据式(5)可绘制出 DFIG 基于转子侧瞬态模型的等效电路，如图 2 所示。

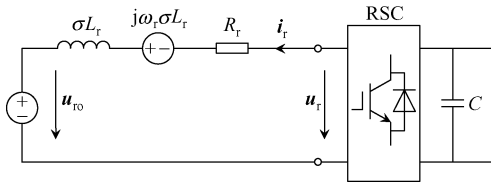


图 2　基于转子侧瞬态的 DFIG 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG based on rotor-side transient

从式(5)和图 2 可以看出，影响转子电流的主要因素如下。

(1)转子开路电压 $\boldsymbol{u}_{ro}$。转子开路电压主要受定子磁链、定子参数和转速的影响。当电网电压故障时，由于磁链不能突变，定子磁链将感应出直流分量及不对称电压故障时的负序分量，二者切割转子绕组导致转子开路电压升高。如果 RSC 无法提供大小匹配的电压，将会引起幅值高达 4~5 p.u.的振荡电流，从而导致电磁转矩振荡和直流侧母线过电压等问题。

(2)RSC 交流侧电压 $\boldsymbol{u}_{r}$。RSC 交流侧电压最大值由直流侧母线电压决定，对于给定的双馈风力发电机而言，其抑制转子过电流的能力是有限的。

(3)转子回路总阻抗。通过人为改变转子回路的总阻抗可以抑制转子过电流。

综上所述，研究 DFIG 的瞬态行为有助于双馈风力发电机故障穿越和瞬态性能问题的解决。尤其是转子过电流，其反映了 DFIG 的故障穿越能力。因此，精确且具有一般意义地解出转子过电流解析式具有重要的理论和实际意义，可用于故障电流最大值、交直流分量及继电保护整定所需的短路电流计算等。

近年有大量文献研究了 DFIG 的瞬态行为。文献[11]较早地从理论上分析了对称电压跌落时 DFIG 定子磁链动态特性及其对转子开路电压的影响；文献[12]进一步研究了不对称电压跌落时的相关内容，解出了转子开路电压的精确解析式，并推导出开路电压的最大值表达式，其最大值与电压跌落程度和转差率有关。此研究为后续转子过电流解析式的求解和瞬态特性的分析提供了思路。

文献[13]重点讨论 DC-chopper 电阻值对机端三相短路时计算定子电流最大值和周期分量的影响，其导致的相对误差可达 30%~60%；文献[14]详细推导了 DFIG 对称和不对称时的定子电流解析式，其能够反映实际定子电流的瞬态变化规律，同时论证了撬棒(Crowbar)对定子短路电流的抑制作用的有效性。

文献[15]以确定 Crowbar 电阻值为目的，通过分析机端三相短路时定子电流表达式近似求出转子过电流的最大值；文献[16]分析了机端三相短路时转子电流时域表达式，并对 Crowbar 电阻值的选择进行了优化；文献[17]分析了 Crowbar 投入时刻对 DFIG 瞬态特性的影响，认为 Crowbar 的滞后投入不利于抑制转子故障电流，并给出了 20~30 倍转子电阻的 Crowbar 电阻值的选择范围。

文献[18]重点分析 Crowbar 投入后不同电压跌落程度和不同故障类型条件下 DFIG 瞬态行为，解出了定、转子过电流时域表达式，为 Crowbar 保护电路的有效性提供了理论支撑；文献[19]利用 DFIG 状态方程的特征根定义了定、转子磁链耦合的系数，更精确地分析了 Crowbar 投入后对 DFIG 对称电压故障时的瞬态特性影响。

转子侧变换器控制对双馈感应电机瞬态特性的影响也引起了广泛关注[20-22]。文献[20]分析了电压对称跌落 40%的情况下，转子侧变换器控制对定子故障电流的影响，给出了定子故障电流的时域表达式，认为不同转子电流控制策略对定子电流瞬态特性有较大影响；文献[21]依据变换器输入输出外特性等值数学模型，分析了转子侧变换器控制动态在对称故障时对 DFIG 瞬态特性的影响，给出了转子电流的时域表达式，为转子电流控制策略的改进提供依据；文献[22]基于转子侧等效控制分量的概念，将整个电磁暂态分为不同的状态响应，分析了对称故障时 DFIG 瞬态特性受转子侧变换器控制影响的特点，具有清晰的物理意义。

文献[23]具有一般意义地给出了转子短路电流

的时域解析式，其适用电压跌落程度不同的电压故障，但其分析仍然不够精确，仅分析了对称电压跌落的情况；文献[10]推导出了对称故障时转子电流的精确时域表达式，理论计算结果能够精确再现 DFIG 的瞬态特性，不对称电压故障发生的概率更大，尤其是单相对地故障，有待进一步研究。

可见，按照以上分析，DFIG 瞬态行为分析从特殊到一般演化的过程正体现了双馈风力发电机故障穿越方案逐步优化的过程，具体如下。

(1)考虑 Crowbar 的投入。目的是计算转子过电流的最大值，进而选出能够抑制该电流的 Crowbar 电阻以确保 DFIG 转子过电流在允许范围内。但就 DFIG 瞬态行为而言，由于 Crowbar 投入后，转子绕组被短路，双馈电机运行在异步电机状态，未体现出 DFIG 的特点。

(2)考虑 RSC 的影响。主要是评估 RSC 控制策略对 DFIG 瞬态特性尤其是定、转子过电流的影响，为提出好的转子电流控制算法提供理论依据。RSC 控制策略对 DFIG 转子过电流的抑制能力最终体现在 RSC 输出交流电压的能力上，因此，控制策略的故障穿越方案抑制转子过电流的能力受 RSC 限制。

(3)具有一般意义的分析。主要目的是解出 DFIG 具有一般意义的转子过电流精确时域表达式，精确再现 DFIG 瞬态行为，为双馈风力发电机全电压穿越和瞬态性能问题的解决提供理论依据。现有的 DFIG 解析模型在分析过程中仅忽略了定子电阻，因此，功率越大精确性越高。利用该 DFIG 解析模型能够确定 Crowbar、转子串电阻电路和定子串电阻电路的阻值范围[6, 24]。

2 双馈风力发电机故障穿越解决方案

近年来，随着科研人员对 DFIG 遭遇电压故障时瞬态特性的深入研究，提出了各具特点的故障穿越方案。主要有 2 大类：一是针对 DFIG 自身的故障穿越方案，二是针对电网电压故障的穿越方案。针对 DFIG 自身的故障穿越方案大体上又可分为基于硬件的故障穿越方法、基于控制策略的故障穿越方法及不同方法的混合等 3 类。

2.1 针对双馈发电机自身的故障穿越方案

2.1.1 基于硬件的故障穿越方法

当 DFIG 遭受电网电压故障时，最大的危害就是转子过电流和功率变换器直流侧过电压。抑制转子过电流，直接、有效且简单的方法非Crowbar 莫属。Crowbar 已经成为 1 种成功的故障穿越保护措施，其能够解决不同电压跌落程度的转子过电流问题。如图 3 所示，当电网故障时，电力电子开关闭合，限流电阻短接转子绕组和转子侧变换器，转子过电流流经 Crowbar 电路并通过限流电阻限制其大小，此时，DFIG 失控并运行在异步状态[3, 18]，图中，R_{sdr} 为限流电阻。Crowbar 电路典型拓扑结构如图 4 所示。按照 Crowbar 中所使用的功率器件不同，有被动 Crowbar 和主动 Crowbar 之分。被动

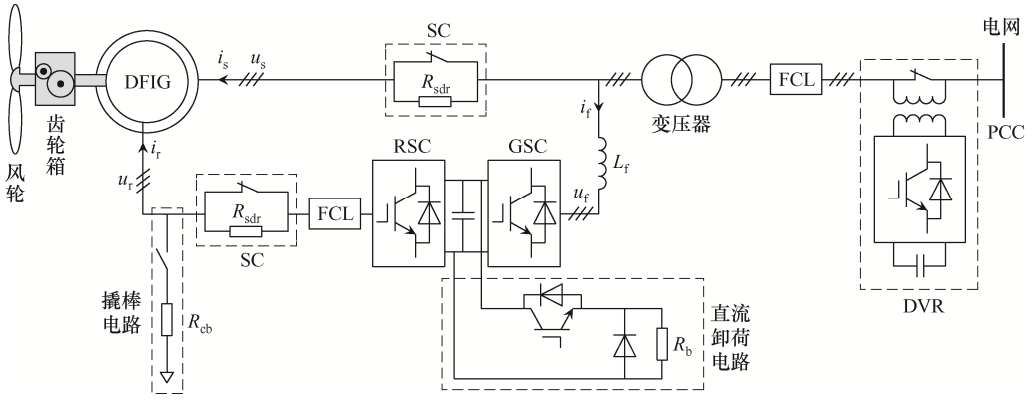
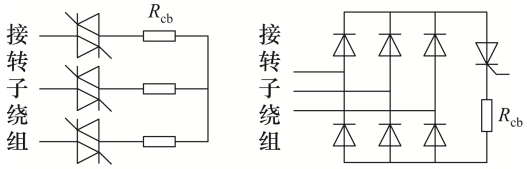


图 3 双馈风力发电机部分硬件穿越保护装置

Fig. 3 Part of hardware FRT protection devices for DFIG-based wind turbine



(a) 交流拓扑　　(b) 直流拓扑

图 4　典型 Crowbar 保护电路拓扑结构

Fig. 4 Topology of typical crowbar protection circuit

Crowbar 由于使用了半控型功率器件而存在无法随时关断的缺点；主动 Crowbar 使用全控型器件，能够随时关断以满足快速向电网输出无功、支撑电网电压的要求[3]。

对于 Crowbar 保护电路，研究的焦点集中在：Crowbar 电阻值确定和优化[15-19]；投入和切除时机及其开关策略[17, 25]；Crowbar 电路拓扑改进[26-27]。

Crowbar 电阻阻值的选择是其穿越能力的关键所在，其范围[6]通常表示为

$$\begin{cases} R_{\mathrm{cb,min}} = \dfrac{1}{I_{\mathrm{r,lim}}}\sqrt{1.69[(1-s)U_{\mathrm{s}}]^2 - (\omega_{\mathrm{r}}\sigma L_{\mathrm{r}} I_{\mathrm{r,lim}})^2} \\ R_{\mathrm{cb,max}} = \dfrac{U_{\mathrm{r,max}}\omega_{\mathrm{r}}\sigma L_{\mathrm{r}}}{\sqrt{1.69[(1-s)U_{\mathrm{s}}]^2 - U_{\mathrm{r,max}}^2}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$R_{\mathrm{cb,min}}$ 为限流电阻最小值；$R_{\mathrm{cb,max}}$ 为限流电阻最大值；$I_{\mathrm{r,lim}}$ 为转子电流安全限值；s 为滑差；U_{s} 为定子电压幅值；$U_{\mathrm{r,max}}$ 为转子电压允许的最大值。

对于功率变换器直流侧过电压，可首选直流卸荷电路(DC-chopper)的方案，如图 3 所示。其拓扑结构和控制较为简单，能有效确保直流母线电压稳定。其电阻值[6]可表示为

$$R_{\mathrm{b}} = \frac{U_{\mathrm{dc,max}}^2}{P_{\mathrm{b,max}}} \tag{7}$$

式中：R_{b} 为卸荷电阻；$P_{\mathrm{b,max}}$ 为卸荷电阻允许消耗的最大功率；$U_{\mathrm{dc,max}}$ 为直流母线允许的最大电压。

Crowbar 电路的最大问题是一旦投入运行，DFIG 就异步运行，导致 DFIG 失控和消耗无功，不利于机组转速的稳定和电压故障的恢复。为此，可在转子和变换器间串入电阻[28]或阻抗(*R-L* 电路)[29]作为 Crowbar 电路的替代方案(见图 3)。在理想电网条件下，保护装置的开关处于关闭状态，旁路其限流电阻；在电网电压故障时，电路的双向开关打开，故障电流流经电阻，确保转子故障电流的大小在规定范围之内，从而消耗有功，减轻直流侧过电压和转矩振荡。与 Crowbar 电路相比，其亮点是电网电压跌落时无需封锁 RSC，仍然是一个双馈发电机。该方案同样具有结构简单、实现容易的优点，又能解决 Crowbar 保护时电机失控和消耗无功的问题，是 1 种非常有前景的方案。上述电路也可串入定子绕组实现转子故障电流的抑制[24, 30](见图 3)。

故障电流限制器 FCL(fault current limiter)是解决过电流的 1 种可行手段，类似转子串阻抗，如图 3 所示，其可放置在转子侧，也可放置在电网侧。在电网正常运行时，FCL 对电网运行没有影响；一旦电网故障，快速投入限流元件，抑制故障电流。文献[31]较早提出利用 FCL 改善 DFIG 的故障穿越能力；文献[32]评估了桥型 FCL 加强 DFIG 的故障穿越能力，并通过在桥型 FCL 中插入旁路电阻解决电磁转矩的振荡问题；文献[33]在 FCL 中引入超导线圈，其能将转子过电流有效抑制至无超导 FCL 时的 50%，并能有效改善系统有功、无功动态；超导 FCL 进一步发展为磁链耦合型超导 FCL，其能改善 DFIG 机端电压[34]；文献[35]重点评估了 FCL 阻抗值、切入切出时间及变换器控制参数对 DFIG 瞬态的影响，尽管 FCL 能有效改善风力发电机故障穿越能力，但和转子串电阻相比较，其成本高、维护复杂，尤其是超导 FCL。

这类方法依赖于硬件装置，势必增加系统复杂性和成本，抹杀了 DFIG 变换器功率小带来的成本优势。但对于严重的电压跌落穿越却是必需的。另外，任何硬件装置对于 DFIG 来说都是一种扰动，应尽可能避免其使用。

2.1.2　基于控制策略的故障穿越方法

双馈发电机目前常用的控制方法是矢量控制技术。该技术在 DFIG 端电压恒定的条件下，能够保证其良好的运行性能。RSC 常用的控制结构为双通道双环控制方案，一是有功控制通道，二是无功控制通道，每个通道都由 1 个快速的转子电流内环

和 1 个功率外环组成，详情如图 5 所示[36]。图中：Δu_{qr} 和 Δu_{dr} 为前馈电压补偿；ω_1 为同步角频率；i_{dr} 和 i_{qr} 分别为转子电流 d、q 轴分量；u_{qs} 为定子电压 q 轴分量；$i_{dr,ref}$ 和 $i_{qr,ref}$ 分别为转子电流 d、q 轴分量指令；$u_{dr,ref}$ 和 $u_{qr,ref}$ 分别为转子电压 d、q 轴分量指令；P_s 和 Q_s 分别为定子有功和无功。

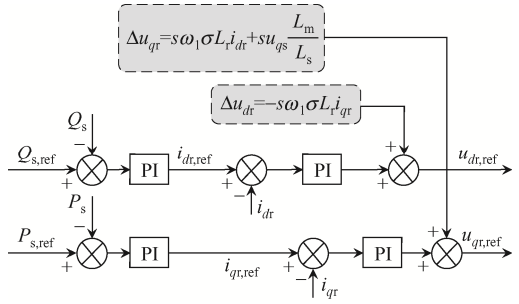


图 5 双馈风力发电机传统矢量控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of traditional vector control system for DFIG-based wind turbine

根据前文分析，在电网电压故障时，导致 DFIG 转子过电流的主要原因是定子磁链动态在转子回路里感应出较大的反电动势。因此，快速衰减定子磁链中的直流分量和负序分量成为抑制转子过电流的有效途径，是目前颇受关注的焦点。

基于矢量控制技术，文献[36]提出前馈瞬态电流控制，其思路是给前馈电压补偿项实时引进定子动态以匹配 RSC 交流侧电压，能够减少转子瞬态电流、Crowbar 保护介入机会及转矩二次纹波；文献[29]通过利用串联 *R-L* 电路和转子电流进一步修正前馈电压补偿项，结合所提策略和串联 *R-L* 电路能够加强 DFIG 的穿越能力和改善其瞬态性能。

文献[37]提出在转子电流参考值中引入与定子磁通直流分量和负序分量相反的电流，加速其衰减至正常的定子磁通状态以减小转子开路电压，从而抑制转子过电流，适用于不同类型的电网电压故障。引入的电流被称为退磁电流，这个方法被称为退磁电流控制，其控制结构如图 6 所示。图中：$i_{rf,ref}$ 和 $i_{rn,ref}$ 分别为转子电流强迫分量和自然分量指令；i_{rdq} 为 dq 坐标系下转子电流；$i_{rdq,ref}$ 为 dq 坐标系下转子电流指令；$u_{rdq,ref}$ 为 dq 坐标系下转子电压指令；ψ_{sn} 为定子磁链自然分量；K_d 为正常数。文献[38]则把退磁电流作为故障控制模式，采用控制模式转换的思想，仅在故障时切换至故障控制模式，如此的好处是不影响理想电网条件下的机组正常运行，问题是必须安装故障发现设备，以实现 2 种控制模式的转换。此外，文献[39-40]采用的也是退磁电流控制的方案，但定子磁链瞬态的计算有所不同。不同的定子磁链瞬态评估方案如图 7 所示，图中：$\psi_{0,s}$ 为定子磁链直流分量；$\psi_{2,s}$ 为定子磁链负序分量；$\psi_{f,s}$ 为定子磁链强迫分量；i_{sdq} 为 dq 坐标系下定子电流。由图 7 可见，文献[39]省去了负序分量的分离，简化了算法，但仅适用对称故障；文献[40]省去了积分环节，在定子自然磁链的计算中使用了限幅器和同步转速，文中仅验证了对称故障的有效

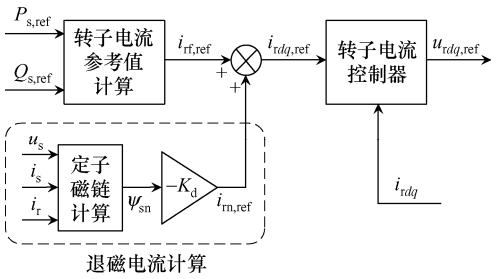


图 6 退磁电流控制框图

Fig. 6 Block diagram of demagnetization current control

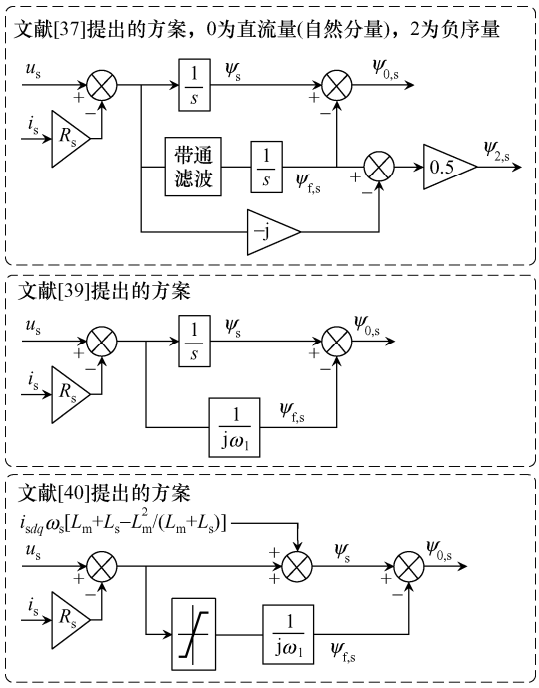


图 7 不同的定子磁链瞬态评估方案

Fig. 7 Different evaluation schemes for stator flux transient

性。文献[41]仅在无功控制中引入励磁电流自然分量(励磁电流通过带通滤波器所得)加速定子磁链瞬态分量的衰减，不需要电压故障发现设备，在电网故障期间向电网补偿无功。

此外，文献[42]提出基于虚拟阻尼磁链方案加速定子瞬态磁链衰减以抑制转子过电流；文献[43]在转子电流控制环中引入虚拟电阻来抑制转子过电流和电磁转矩的振荡；文献[44]则在转子电流控制环中引入虚拟电感来抑制转子过电流和电磁转矩的振荡。

非线性的控制策略也被用来加强双馈风力发电机的故障穿越能力和瞬态性能。文献[45]提出在故障时用基于矢量控制的滞环控制器代替传统 PI 控制器；文献[46]试图利用基于李雅普诺夫函数的非线性控制器改善 DFIG 的穿越能力，但实现较为复杂；文献[47]提出低增益自适应滑模控制，以缓解高增益滑模控制存在的转子参考电压抖动问题；文献[48]通过比较研究认为模糊控制在平滑功率输出、稳定直流电压方面好于滑模控制；文献[49]结合二者的优点提出网侧和转子侧变换器的模糊二阶积分终端滑模控制。然而，上述方法大多会产生高频控制信号从而导致谐波、机械应力和热损耗增加。

2.1.3　混合的故障穿越方法

根据前文分析，控制的故障穿越方案仅能协助双馈风力发电机穿越不严重的电网电压故障。而硬件的故障穿越方案能够协助双馈风力发电机穿越更为严重的电压故障，但其需要增加硬件设备，同时其对于双馈风力发电机来说是一种扰动，存在瞬态性能差的问题。因此，硬软件结合故障穿越方案被提出并得到了广泛关注，被称为混合的故障穿越方法。这一方法要遵循的主要原则是尽可能减少硬件保护电路投入的机会和时间，以避免其对双馈风力发电机瞬态性能的影响。为达此目的，好的控制策略是必须的，仍是今后研究的重点。典型的混合故障穿越方案有退磁电流控制加转子串电阻[38]和退磁电流控制加Croowbar 电路[39]等。

2.2　针对电网电压故障的穿越方案

除了从双馈风力发电机自身角度解决故障问题以外，还可以从稳定电网电压的角度解决，典型的方案是动态电压恢复器 DVR(dynamic voltage restorer)。DVR 是 1 种串联型电能质量控制器，能在几 ms 内恢复电压或解决电压故障问题，能解决双馈风力发电机全电压故障穿越问题和瞬态性能问题[50-52]。DVR 能放在网侧与发电机串联以维持定子电压的恒定(见图 3)。DVR 的应用不涉及双馈风力发电机本身，但成本较高。针对 DVR 方案成本高的问题，文献[52]提出 1 种有效降低 DVR 容量的方案。

DVR 实际上是无功补偿设备，类似的装置还有静止无功补偿器 SVC(static VAR compen-sator)[53]、静止同步补偿器 STATCOM(static synchronous compensator)[54]。此外，还有储能系统等其他装置在双馈风电机组故障穿越中的应用，这里不再赘述。

3　结论

基于风电并网规范的技术要求，针对主流机型双馈风力发电机，首先综述了双馈感应电机故障穿越机理分析方法的现状，然后进行了双馈风力发电机故障穿越方案的梳理，完成了不同解决方案的综合比较和深入分析并进行了归类。基于上述分析，得出如下结论。

(1)大多数成果仅局限在考虑 Crowbar 保护电路投入后的电磁暂态分析，这无形中又回到了笼型异步感应电机的瞬态分析，没有体现出双馈感应电机的特点，不具有一般性。

(2)双馈感应电机故障期间有功、无功及电磁转矩的暂态解析模型没有引起足够关注，而这正是改善双馈感应电机瞬态性能的关键，比如减少功率振动从而改善功率质量、减少电磁转矩振动从而减少对传动链的应力冲击等。

(3)控制策略的方法对系统的影响较小，而硬件保护电路对系统的影响较大。对于双馈风电机组

而言，硬件保护电路实际上也是一种扰动。

(4)控制策略的方法成本上要比硬件电路的方法低。不过，在硬件保护电路中，Crowbar 保护电路成本不高，但其存在电机失控和吸收无功的问题。

(5)转子串联保护电路结构简单、成本低，能解决Crowbar保护电路存在的电机失控和吸收无功的问题，值得进一步研究。

(6)软硬件混合的故障穿越方案是 1 种有前景的故障穿越方案，其中好的控制策略能够大大减少硬件电路运行的机会和时间，从而减少硬件保护装置对双馈机组的影响。

(7)考虑到双馈感应电机瞬态特性的非线性特点，非线性控制策略研究仍然不够深入，有待进一步深入研究。

(8)发生概率更高的不对称电压故障时，对双馈感应电机瞬态特性及故障穿越技术的研究仍然不足，需要系统性的深入研究。

总之，由于系统性的双馈感应电机瞬态理论分析缺乏，无法解决双馈风电机组全电压故障穿越和瞬态性能问题，仍没有形成系统性的方案。现有的双馈感应电机瞬态理论分析，无论是从基础理论还是从指导应用，均不具备有效的理论指导和技术应用手段，应该成为下一步研究的重点。

参考文献：

[1] 杨蕾, 向川, 黄伟, 等. 基于不同工况下双馈风机响应控制的电力系统频率控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 91-100.
Yang Lei, Xiang Chuan, Huang Wei, et al. Frequency control method for power system based on DFIG response control under different working conditions [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 91-100. (in Chinese)

[2] 孙东阳, 孟繁易, 王南, 等. 基于反步自适应准谐振控制的双馈风机次同步振荡抑制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2375-2390.
Sun Dongyang, Meng Fanyi, Wang Nan, et al. DFIG sub-synchronous oscillation suppression strategy based on backstepping adaptive quasi-resonant control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2375-2390. (in Chinese)

[3] 邹志策, 张玉荣, 雷一, 等. 基于转子多阶串联动态电阻的 DFIG 自适应 LVRT 控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 224-233.
Zou Zhice, Zhang Yurong, Lei Yi, et al. Adaptive low voltage ride through control strategy based on rotor multi-step series dynamic resistor for doubly fed induction generator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 224-233. (in Chinese)

[4] 年珩, 程鹏, 贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4184-4197.
Nian Heng, Cheng Peng, He Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4197. (in Chinese)

[5] 苗晓阳, 李冰然, 傅洪全. 适用于 DFIG 连接到直流微网的双变换器设计与实现[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 170-181.
Miao Xiaoyang, Li Bingran, Fu Hongquan. Design and implementation of dual-converter for connecting DFIG to DC microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 170-181. (in Chinese)

[6] 凌禹. 大型双馈风电机组故障穿越关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Ling Yu. Research on the key techniques of fault ride through for wind turbines with doubly fed induction generator [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)

[7] Slootweg J G, de Haan S W H, Polinder H, et al. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 144-151.

[8] Seman S, Niiranen J, Arkkio A. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1782-1789.

[9] Lima F K A, Luna A, Rodriguez P, et al. Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

2010, 25(1): 118-130.

[10] 凌禹. 对称电压故障下双馈风力发电机瞬态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6871-6879.
Ling Yu. Transient characteristics analysis of DFIG-based wind turbine under symmetrical voltage fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6871-6879. (in Chinese)

[11] Lopez J, Sanchis P, Roboam X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.

[12] LÓpez J, GubÍa E, Sanchis P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.

[13] 潘文霞, 刘明洋, 杨刚, 等. 考虑 Chopper 保护的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5454-5460, 5545.
Pan Wenxia, Liu Mingyang, Yang Gang, et al. The calculation of short-circuit current of double fed induction generators considering chopper protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5454-5460, 5545. (in Chinese)

[14] 李斌, 王欣, 赵黎丽, 等. 考虑撬棒保护的双馈风力发电机定子短路电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 1-6.
Li Bin, Wang Xin, Zhao Lili, et al. Calculation of DFIG stator short-circuit current considering crowbar protection [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 1-6. (in Chinese)

[15] Morren J, de Haan S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

[16] 徐玉琴, 曹璐璐. 双馈感应发电机暂态特性分析及Crowbar阻值优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 93-100.
Xu Yuqin, Cao Lulu. Transient characteristics analysis of doubly fed induction generator and resistance optimization of crowbar circuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 93-100. (in Chinese)

[17] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.
Wang Zengping, Li Jing, Zheng Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117. (in Chinese)

[18] 郑重, 杨耕, 耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-15.
Zheng Zhong, Yang Geng, Geng Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with crowbar protection under grid faults [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-15. (in Chinese)

[19] 付元欢, 李银红, 何璇, 等. 电网故障下计及撬棒保护的双馈感应发电机暂态解析修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4591-4600, 4884.
Fu Yuanhuan, Li Yinhong, He Xuan, et al. Corrected transient analysis model of doubly fed induction generator with crowbar protection under grid fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4591-4600, 4884. (in Chinese)

[20] Kong Xiangping, Zhang Zhe, Yin Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of the DFIG considering dynamic response of the RSC [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 278-287.

[21] 尹俊, 李彦彬, 熊军华, 等. 双馈风电场群短路电流计算与故障分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 113-122.
Yin Jun, Li Yanbin, Xiong Junhua, et al. Short circuit current calculation and fault analysis method of DFIG wind-farm groups [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 113-122. (in Chinese)

[22] 杨淑英, 周天保, 谢震, 等. 计及转子电流控制动态的双馈电机电磁暂态过程解析研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2136-2144.
Yang Shuying, Zhou Tianbao, Xie Zhen, et al. Analytical study of electromagnetic transient process in DFIG involving rotor current control response [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2136-2144. (in Chinese)

[23] Ling Yu, Cai Xu. Rotor current dynamics of doubly fed

induction generators during grid voltage dip and rise [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 17-24.

[24] 张琛, 李征, 蔡旭, 等. 采用定子串联阻抗的双馈风电机组低电压主动穿越技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 2943-2951.
Zhang Chen, Li Zheng, Cai Xu, et al. An active low voltage ride through strategy of DFIG-based wind turbine using stator series impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2943-2951. (in Chinese)

[25] 李鸿儒, 金炜东, 胡立锦, 等. 基于无功判定法的 Crowbar 保护电路退出控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 99-103.
Li Hongru, Jin Weidong, Hu Lijin, et al. Crowbar protection circuit quitting control based on the reactive power judgment [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 99-103. (in Chinese)

[26] Vidal J, Abad G, Arza J, et al. Single-phase DC crowbar topologies for low voltage ride through fulfillment of high-power doubly fed induction generator-based wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 768-781.

[27] Yang Shuying, Zhou Tianbao, Sun Dengyue, et al. A SCR crowbar commutated with power converter for DFIG-based wind turbines [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 81: 87-103.

[28] 凌禹, 蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 25-30.
Ling Yu, Cai Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 25-30. (in Chinese)

[29] Justo J J, Mwasilu F, Jung J W. Enhanced crowbarless FRT strategy for DFIG based wind turbines under three-phase voltage dip [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 142: 215-226.

[30] 凌禹, 蔡旭, 汪宁渤. 定子撬棒和直流侧卸荷电路协调的故障穿越技术[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 90-94.
Ling Yu, Cai Xu, Wang Ningbo. Combination of stator crowbar and DC-link discharge resistor for fault ride-through(FRT) of DFIG [J]. Electric Power, 2013, 46(12): 90-94. (in Chinese)

[31] Fazli M, Talebi N. A new method for uninterrupted operation of wind turbines equipped with DFIGs during grid faults using FCL [C]// 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Prague, Czech Republic, 2010: 33-36.

[32] Guo Wenyong, Xiao Liye, Dai Shaotao, et al. Evaluation of the performance of BTFCLs for enhancing LVRT capability of DFIG [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3623-3637.

[33] Elshiekh M E, Mansour D A, Azmy A M. Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5601204.

[34] Chen Lei, Deng Changhong, Zheng Feng, et al. Fault ride-through capability enhancement of DFIG-based wind turbine with a flux-coupling-type SFCL employed at different locations [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 25(3): 5201505.

[35] 李生虎, 黄杰杰, 吴正阳. 基于故障电流解析表达的 FCL 协助 DFIG 低电压穿越研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 8-13, 21.
Li Shenghu, Huang Jiejie, Wu Zhengyang. LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 8-13, 21. (in Chinese)

[36] Liang Jiaqi, Howard D F, Restrepo J A, et al. Feed-forward transient compensation control for DFIG wind turbines during both balanced and unbalanced grid disturbances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1452-1463.

[37] Xiang Dawei, Ran Li, Tavner P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.

[38] Mohammadi J, Afsharnia S, Vaez-Zadeh S. Efficient fault-ride-through control strategy of DFIG-based wind turbines during the grid faults [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 88-95.

[39] Lopez J, Gubia E, Olea E, et al. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under sym-

metrical voltage dips [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4246-4254.

[40] Kenan Döşoğlu M. A new approach for low voltage ride through capability in DFIG based wind farm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 251-258.

[41] Mendes V F, de Sousa C V, Silva S, et al. Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage sags [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1161-1171.

[42] Zhu Rongwu, Chen Zhe, Wu Xiaojie, et al. Virtual damping flux-based LVRT control for DFIG-based wind turbine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 714-725.

[43] Hu Sheng, Lin Xinchun, Kang Yong, et al. An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3653-3665.

[44] Xie Zhen, Zhang Xuguang, Zhang Xing, et al. Improved ride-through control of DFIG during grid voltage swell [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(6): 3584-3594.

[45] Mohseni M, Islam S, Masoum M A S. Fault ride-through capability enhancement of doubly-fed induction wind generators [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(5): 368-376.

[46] Rahimi M, Parniani M. Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 25(2): 514-525.

[47] Djoudi A, Chekireb H, Bacha S, et al. Lower gain adaptive sliding mode control of DFIG stator powers [C]// 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014). Naples, 2014: 1-6.

[48] Riouch T, El-Bachtiri R. Comparative study of fuzzy logic controller and sliding mode for enhancing the behavior of the DFIG under fault [C]// 2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS). Marrakech, Morocco, 2014: 1602-1607.

[49] Morshed M J, Fekih A. A new fault ride-through control for DFIG-based wind energy systems [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 258-269.

[50] 凌禹. 动态电压恢复器在双馈风电机组故障穿越中的应用[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1156-1164.
Ling Yu. Application of dynamic voltage restorer in fault ride through of doubly-fed wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(4): 1156-1164. (in Chinese)

[51] 凌禹, 窦真兰. 基于 DVR 的双馈风电机组不对称电压故障穿越[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 65-70, 77.
Ling Yu, Dou Zhenlan. Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 65-70, 77. (in Chinese)

[52] Zhang Shao, Tseng K J, Choi S S, et al. Advanced control of series voltage compensation to enhance wind turbine ride through [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 763-772.

[53] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16-23, 180.
Li Ran, Tang Fan, Liu Yingpei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 16-23, 180. (in Chinese)

[54] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用STATCOM提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51, 71.
Wu Jie, Sun Wei, Yan Bingchao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using STATCOM [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51, 71. (in Chinese)



凌禹

作者简介：

凌禹(1975—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源电能转换及其控制技术。E-mail：pleasurely@126.com。

(责任编辑：耿越)