

双馈式风力发电机低电压穿越技术分析

王 伟^{1,2}, 孙明冬², 朱晓东²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

(2. 国网南京自动化研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 随着一些地区风电供应比例的急剧增加, 大规模风电场对地区电网稳定性造成的影响愈发显著。风力发电机的低电压穿越(LVRT)技术越来越受关注。文中首先介绍了低电压穿越技术的概念、国外的相应标准, 继而分析比较了有关此技术的双馈感应发电机建模问题、各种常见的实现低电压穿越的技术手段及改进控制策略。最后描述了具备此技术的风电场对电力系统的影响。

关键词: 双馈感应发电机; 风力发电; 低电压穿越

中图分类号: TM614; TM761

0 引言

风电作为目前最具规模化开发和商业化发展前景的新能源技术, 在全球以年增长率超过 30% 的速度成为发展最快的清洁能源。双馈式风力发电机则由于具有能够变速运行、变流器容量小等优点正成为使用最广泛的变速恒频风力发电机之一。

目前, 变速恒频式风力发电机, 尤其是双馈式风力发电机在应对电网故障能力方面存在较大缺陷。电网发生故障容易导致风力发电机机端电压跌落, 造成发电机定子电流增加。由于转子与定子之间的强耦合, 快速增加的定子电流会导致转子电流急剧上升。另外, 由于风力机调节速度较慢, 故障前期风力机吸收的风能不会明显减少, 而发电机组由于机端电压降低, 不能正常向电网输送电能, 即有一部分能量无法输入电网, 这些能量由系统内部消化, 将导致电容充电、直流电压快速升高、电机转子加速、电磁转矩突变等一系列问题。上述问题容易导致系统元器件的损坏^[1-2]。

过去为保护设备, 即使电网出现比较轻微的故障, 风力发电机也要与电网解列^[3]。但风力发电机容量、风电场规模越来越大, 如果大规模风电机组从电网解列, 它就失去了对电网电压的支撑能力, 这可能导致严重的连锁反应, 对电网的稳定运行造成严重影响。针对此问题, 目前国外许多电网运营商对风电场提出了强制性要求: 电网电压跌落时, 风电场须维持一定时间与电网连接而不解列, 甚至要求风电场在此过程中能提供无功以支持电网电压的恢复^[4]。此要求即为低电压穿越(LVRT—low

voltage ride through)。双馈式风力发电机由于其自身结构特点, 实现 LVRT 存在以下几方面难点: ①确保故障期间转子侧冲击电流与直流母线过电压都在系统可承受范围之内; ②所采取的对策应具备各种故障类型下的有效性; ③控制策略须满足对不同机组、不同参数的适应性; ④工程应用中须在实现目标的前提下尽量少地增加成本。

本文分析了现有的双馈感应发电机模型、控制策略和各种实现 LVRT 的技术手段, 描述了具备 LVRT 技术的风电场对电力系统的影响。

1 实现 LVRT 的要求

概括地说, 双馈风力发电系统实现 LVRT 的基本要求为:

- 1) 电网故障时, 避免过电流、过电压对变流器造成损坏;
- 2) 尽可能减少故障时机械转矩跃变给齿轮箱和风机带来的冲击, 防止齿轮箱和风机产生机械损坏;
- 3) 满足电网的 LVRT 标准。

在德国, 风电占能源供应比例很高, 为保证风电的发展不给电网稳定性造成威胁, 德国意昂集团下属电网公司 E. ON Netz 已经提出适用于德国电网的低电压穿越标准^[5](其示意图见附录 A 图 A1)。在电网电压跌落到某一幅值时, 此标准对于风力发电机能否跳机, 以及与电网维持连接多长时间方可跳机提出了明确要求。

近几年来中国风电产业发展迅猛, 全国各风力资源丰富的地区已有许多大规模的风电场项目正在或即将上马, 导致这些地区风电占能源供应的比例迅速增大, 给地区电网的稳定性带来了隐患。相信随着风电在国内继续快速发展, LVRT 标准的制定

将很快被提上议事日程。

2 双馈感应发电机建模

2.1 传统分析模型

双馈感应发电机最常用的数学模型是在 d, q 坐标系下的 5 阶模型^[6-9]。其数学模型如下所示(等效电路图见附录 A 图 A2):

$$\begin{cases} u_{ds} = p\psi_{ds} - \omega_1\psi_{qs} - R_s i_{ds} \\ u_{qs} = p\psi_{qs} + \omega_1\psi_{ds} - R_s i_{qs} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = p\psi_{dr} - \omega_2\psi_{qr} + R_r i_{dr} \\ u_{qr} = p\psi_{qr} + \omega_2\psi_{dr} + R_r i_{qr} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e) \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_{ss}i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_{dr} = -L_m i_{ds} + L_{rr}i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_m i_{qs} + L_{rr}i_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2}n_p L_m (i_{ds}i_{qr} - i_{qs}i_{dr}) \quad (6)$$

u, i, ψ 分别为电压、电流、磁链; n_p 为电机极对数; R, L 分别为电阻、电感; $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$, ω_1, ω_r 分别为定子同步电角速度、转子电角速度; 下标 s, r 分别表示定子、转子分量; $L_{ss} = L_s + L_m, L_{rr} = L_r + L_m, L_s, L_r$ 分别为定子、转子漏感; 下标 d, q 分别表示 d, q 轴分量; T_e, T_m 分别为电磁转矩和机械转矩; p 为微分算子。

2.2 降阶暂态分析模型

为进行系统暂态稳定性分析,传统方法是对模型降阶,这种降阶模型称为暂态稳定性模型^[10]。

1) 3 阶模型。如果忽略定子磁链暂态变化,亦即认为 $p\psi_{ds} = p\psi_{qs} = 0$, 感应电机模型即可由 5 阶降到 3 阶,这种 3 阶模型是将转子电压作为被控量^[11]。另外,也可使用转子电流作为被控量来构建 3 阶模型^[12],由这种模型设计的控制器可以快速对电流进行瞬时控制。

2) 2 阶模型。2 阶模型有许多构成方法,比如可由转速和转子磁链作为状态变量构成^[13],也可由转速和转子磁链角作为状态变量构成^[14]。

3) 1 阶模型。如果将定子磁链和转子磁链暂态变化都忽略掉,亦即认为 $p\psi_{ds} = p\psi_{qs} = p\psi_{dr} = p\psi_{qr} = 0$, 那么整理式(1)、式(2)后代入式(3)中便可得到 1 阶模型。这种模型唯一的 状态变量就是转速。

这些降阶模型比常规 5 阶模型简单,用来设计系统控制器可以降低复杂度,且仿真速度快^[15]。但

它们大多对系统做了如下简化:①忽略定子暂态过程中出现的直流分量;②忽略磁饱和;③忽略非线性成分;④忽略电磁暂态过程。事实上,当电网发生故障造成电压跌落时,定子磁链中会产生直流分量,并且定子磁链在这种情况下几乎保持静止,而转子磁链仍在转动,这会产生很高的滑差,从而导致过电流、过电压、过转速的出现^[13]。可见,如果忽略这些成分将很大程度上降低系统精确度。忽略暂态过程的影响,不适于进行电网故障下的分析研究。实际上,即使是 5 阶模型也没有考虑磁饱和问题对系统的影响。

由于低电压穿越研究主要是针对暂态过程,对其进行分析应对传统模型进行改进。

2.3 针对 LVRT 的改进模型

目前已有文献针对 LVRT 分析提出双馈感应发电机建模的改进思路^[2,16-17]。

1) 在传统电机模型中考虑磁饱和^[2]。实现方法是 根据磁饱和曲线对前述方程中电感的取值实时更新。仿真结果表明,考虑磁饱和的模型得到的暂态电流峰值比不考虑的情况要高。因此,设计保护措施时应充分估计故障严重性,须将磁饱和和效应纳入到模型中。

2) 在控制策略实现中考虑电机暂态^[16] 过程。为使控制系统能够在定子电压跌落的情况下实现较好的动态响应,模型中考虑到定子励磁电流分量的瞬态变化。实现方法是通过采用转子侧电压、电流代换 $p\psi_{ds}, p\psi_{qs}$, 为不影响解耦控制实现,采取在转子电压形成处叠加前馈量。仿真验证了该方法的有效性,结果表明设计的控制系统在电网电压跌落时产生的转子电流波动幅值较传统模型控制小;转子电压波动却比传统方法略大。原因在于考虑了定子励磁电流分量变化,转子电压控制部分比传统方法多了一个基于此分量的前馈项,因而在对转子电流良好控制的同时,转子电压不免要有所增大。

3) 采用有限元建模^[17] 方法。仿真研究表明,采用该方法所建模型中由于考虑了非对称情况下定子和转子漏感的磁饱和,因而相对于传统模型暂态响应幅值会更大,但因所建模型过于复杂,实际中不易实现。但是文献[17]研究的结果表明,进行 LVRT 控制策略和建模研究时还须考虑非对称故障情况。

可见, LVRT 建模的改进主要有 2 个方面:

1) 提高双馈感应发电机模型精度,主要是考虑双馈感应发电机主磁通饱和、漏磁饱和、非对称故障等因素。

2) 改善控制策略的适应性、有效性。研究思路是:模型中纳入定子磁链的暂态变化过程,不仅要考

虑到其幅值变化,还应考虑大扰动下相角变化对定向控制的影响,以及模型中纳入电压、电流各序分量在非对称故障下对电机磁链、变流器等的影响。

3 LVRT 的实现方法

3.1 改进控制策略的实现方法

为尽可能少地增加成本,许多学者都在寻求不增加硬件电路,只从改进控制策略的角度入手来实现风电机组低电压穿越的方法^[16,18-20]。

3.1.1 传统控制策略不适于故障过程控制的原因

双馈感应发电机最常用的控制策略之一是基于定子磁链定向的矢量控制方法。由于双馈发电机的定子总是接在工频 50 Hz 的大电网上,此频率下定子绕组的电阻比其电抗小很多,可忽略不计。因 d 轴定在定子磁链方向上,有

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_s \\ \psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

忽略定子磁链的暂态过程,则由式(1)可得:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \approx 0 \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \approx \omega_1 \psi_s \end{cases} \quad (8)$$

由式(4)整理可得:

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{1}{L_{ss}}(\psi_s - L_m i_{dr}) \\ i_{qs} = \frac{L_m}{L_{ss}} i_{qr} \end{cases} \quad (9)$$

将式(7)、式(9)代入式(2)可得:

$$\begin{cases} u_{dr} = \left(L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}}\right) p i_{dr} + R_r i_{dr} + \Delta u_{dr} = \\ \quad \frac{1}{k}(\sigma T p + 1) i_{dr} + \Delta u_{dr} \\ u_{qr} = \left(L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}}\right) p i_{qr} + R_r i_{qr} + \Delta u_{qr} = \\ \quad \frac{1}{k}(\sigma T p + 1) i_{qr} + \Delta u_{qr} \end{cases} \quad (10)$$

又可得:

$$\begin{cases} P = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} = U_s i_{qs} = -\frac{L_m}{L_{ss}} i_{qr} U_s \\ Q = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} = \omega_1 \psi_s i_{ds} = \\ \quad \omega_1 \psi_s \frac{\psi_s - L_m i_{dr}}{L_{ss}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ψ_s, U_s 分别表示定子磁链和定子电压。

式(10)、式(11)分别实现了对双馈电机转子 d 轴, q 轴电压及有功、无功的解耦控制。这种控制策略构造简单,并且可得到很好的稳态响应^[6-9]。

但这种方法显然不适用于对故障过程的分析控制,原因在于:①此控制策略建立在 3 阶降阶模型基础上,它忽略了定子磁链的暂态过程,认为定子磁链

保持不变,但如果故障过程中 $p\psi_{ds} = p\psi_{qs} = 0$ 不成立,由式(10)推导过程可知,转子电压的解耦控制将无法实现;②故障发生时,电机端电压发生跃变,测量定子磁链用的积分器发生积分饱和,可能导致定子磁链定向不准确,由式(11)可知,将会造成有功、无功控制不能解耦,整个控制系统在故障过程中无法实现预想的控制效果。

若实现故障过程中对系统的良好控制,有 2 种途径:一种是设计全新的控制策略;另外一种是在稳态过程仍使用此控制策略,故障发生时配合增加硬件电路切换到相应的故障控制策略。

3.1.2 几种不须增加硬件电路的新控制策略

文献[16,20]对传统模型进行了改进,计及定子磁链的暂态过程,并以此得出新的控制策略。与传统控制策略相比,此方法实现了故障过程中对转子电流更好的控制,但如前所述,此方法在故障过程中转子电压波动会比传统方法稍大。

采用基于可靠控制技术的 H_∞ 和 μ -analysis 方法设计全新的控制器,并考虑各种不利条件^[18]。它的主要控制思路如下:①在故障过程中由于电网无法供给或吸收能量,因而风力发电机的参考功率应设定为 0。②故障过程中转子侧的控制依然进行。③文中建立的 H_∞ 控制器,它的网侧控制器用来检测直流电压的故障和定子端电压的故障,从而产生电流信号来补偿这些故障量;它的转子侧控制器用以检测定子有功和无功的异常,并产生转子电流信号进行补偿。

文献[19]指出双馈感应发电机实现 LVRT 最根本的难点在于故障期间转子产生的反电动势,这个反电动势是由定子磁链的直流和负序分量以及转速决定的。文中利用这一原理通过对反电动势的限制来限制短路过程中的过电流,它的主要思路如下:①利用转子电压来减弱定子磁链中直流和负序分量的作用。②对转子电流进行定向,使得转子电流能够抵消转子磁链中一部分直流和负序分量;另外,为确保转子电流与直流电压的暂态响应都不过大,须对抵消的这部分分量的比例仔细斟酌。③如能够增加双馈感应发电机定子和转子的漏感,将能够增强转子电流的抵消作用,并可提高机组的 LVRT 能力。

由上述文献的仿真结果可看出,不增加硬件电路,只改进控制策略可以减弱某些量的暂态响应。从能量守恒角度分析,电网发生低电压故障时,发电机机端电压比正常工况低,意味着系统无法正常向电网输送电能。同时,由于风力机惯性较大,调桨系统在很短的时间内能调节的范围比较有限,于是捕

获的风能将有一部分过剩,而只通过控制来调节显然不能给这些能量一个释放通道。实际上可认为通过控制策略的改进能够在电压和电流之间达到一个均衡,保证在2个值都不过高的情况下由系统自身将这部分能量吸收。但可想而知,这种方法只适用于电压跌落不十分严重的情况,一旦出现很严重的电压跌落,单纯靠控制策略的改进将难以实现低电压穿越,须增加硬件辅助电路。

3.2 增加硬件电路的实现方法

3.2.1 Crowbar 电路

为双馈感应发电机增加 Crowbar 电路来实现系统的 LVRT 是目前最常用的方法^[17,21-24],适用于双馈感应发电机的 Crowbar 电路有很多种^[24](较常见的加入 Crowbar 电路的双馈感应发电机系统原理图见附录 A 图 A3)。

该电路中电阻的选取至关重要,既不能太大以防变流器端电压过高,也不能太小致使不能有效限制电流。短路发生时接入 Crowbar 电路进行限流。如果电压跌落时间较长,超过 0.1 s,则断开 Crowbar 并使系统运行在正常工作模式,电机即可在故障期间为电网提供无功^[23]。但应注意,如果在切换时不采取特殊的控制则会产生较严重的暂态过程。由于在此过程中电机始终没有与电网解列,因而电机仍能产生电磁转矩以抵消风机产生的机械转矩,故电机转速不会上升过高。

故障消除后,风力发电机恢复到正常工作状态,但如不采取特殊控制策略,在电压恢复造成的暂态过程中,各 PI 环节的给定与实际返回值之间的不匹配会导致积分饱和,这将产生严重的暂态响应。因此,为得到平滑的切换过程,须将各参考值设定为此过程中的实际值,这才能较缓慢地过渡到正常状态^[23]。

该方法简单有效,且成本较低,便于实现,但实际效果严重依赖于内部运行条件和故障特征,对于非对称故障能起到的作用有限;并且 Crowbar 在不同运行状态间切换会不可避免地产生暂态响应^[23],尤其是在电压恢复过程中,电网电压从故障状态恢复到正常会使系统产生一个暂态过程,若此时 Crowbar 退出还将加剧该暂态过渡过程。

3.2.2 能量存储系统

电压跌落故障期间对直流电压进行控制,亦可使用能量存储系统(ESS)^[25](其系统图见附录 A 图 A4)。该系统可将故障期间的过剩能量储存起来,并在故障结束后将这些能量送入电网。此方法可解决使用 Crowbar 须在不同运行状态间切换的问题,既避免了工况切换造成的暂态过程,且可对系

统进行持续调控。缺点也很明显,ESS 无法对转子电流进行有效控制,若要保证变流器不因为转子过电流而损坏,转子侧变流器须选用较大容量的 IGBT。

3.2.3 定子侧的电子开关

为保持系统控制能力,限制短路电流,避免转矩振荡,可在定子侧与电网之间每相反向并联一对晶闸管作为电子开关,使定子快速与电网分离^[22,26](原理如附录 A 图 A5 所示)。控制过程为:故障时,切断定子与电网连接,同时控制转子侧逆变器使电机去磁;电压恢复时,控制转子侧逆变器给电机励磁,使双馈电机尽快与电网同步,电机定子侧重新连接到电网,恢复正常工作。

此方法的缺点是:①正常工况下,晶闸管持续导通会降低系统效率;②类似于采用 ESS 的方法,这种方案也要选用较大定额的 IGBT 方能解决转子过电流问题;③此方案并未实现真正意义上的不脱网运行。

4 LVRT 对电力系统的影响

目前已有许多文献研究了风力发电机风电场 LVRT 特性对电力系统的影响^[27-30]。

文献[27]研究了在较弱的输电系统中加入一个由双馈式风力发电机组构成的 100 MW 风电场对系统产生的影响,并与一个在同样位置的传统电站造成的影响做了对比。仿真结果表明双馈感应发电机能够在同样的条件下提供更好的响应。这个结果说明,由具有 LVRT 能力的双馈式风电机组构成的风电场,能够连接到较弱的电网中而不会降低系统的稳定性。

文献[28]比较了具备 LVRT 能力的风电场与不具备此能力的风电场的区别。文中表明没有 LVRT 能力的风电场会在故障过程中跳机,而具有 LVRT 能力的风电场能够显著改善系统的性能,也降低了对系统中其他部分的要求。因而此文指出,在电网中处于同一位置的风电场比传统电站具有更好的稳定性能。

文献[29]通过仿真实验得出:对于电网某些连接点让制造商实现风电场 LVRT 是不现实的,而通过比较发现对其他连接点 LVRT 能力又是必需的,否则风力发电机跳机会导致系统不稳定。并指出 LVRT 要求应对应于相应的电网连接特性以及风电场的互连方法进行综合考虑。在某些情况下, LVRT 的电压限制值应该适当升高,这样能节省许多工程调研工作并能吸引投资者来建设风电场;另外,这还能在一定范围内降低电价从而加快风电的

发展。

各文献的研究结果表明:由具有 LVRT 能力的双馈式风力发电机组建的风电场接入电网不但不会带来不利影响,反而相对于传统电站能更好地改善系统性能。

5 结论

本文通过研究双馈感应发电机 LVRT 条件下的建模、控制实现,以及其对电网的影响,介绍了双馈式风力发电机 LVRT 技术的发展现状,得出了以下几点结论:

1)由于传统暂态分析模型忽略了磁饱和、非线性成分、电磁暂态过程等内容,如果使用它们进行 LVRT 技术的研究可能会对故障严重性估计不足,从而影响保护装置的设计。在故障分析过程中须使用更完整详细的模型。

2)通过改进控制策略可在很大程度上改善系统的暂态响应。但基于对能量守恒关系的分析,对于很严重的电网电压跌落故障,仅仅改进控制策略很难同时克服系统的过电流和过电压问题。因此,增加硬件电路是不可避免的。

3)几种增加硬件电路实现低电压穿越的方法各有利弊,都存在一些较难克服的问题。研究过程中可考虑几种方法结合使用,或是改进相应的控制策略。

4)具备 LVRT 能力的风电场不但不会给电网带来不利影响,反而相对于传统电站能够改善系统的性能,这一特点决定了 LVRT 研究将是今后风电研究中的一个重点。

中国的 LVRT 研究今后将主要面临以下问题:建立适用于中国电网的 LVRT 技术规范,且能够针对具体区域电网、具体接入点对标准进行适当修改;建立具备 LVRT 能力的风力发电机模型,并将该模型集成于现有商业电力系统分析软件中;形成对 LVRT 功能、效率、影响的评价方法,并建立相关测试与评估环境。

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

参考文献

- [1] PETERSSON A, LUNDBERG S, THIRINGER T. A DFIG wind-turbine ride-through system influence on the energy production. *Wind Energy*, 2005, 8(3): 251-263.
- [2] PERDANA A, CARLSON O, PERSSON J. Dynamic response of grid-connected wind turbine with doubly fed induction generator during disturbances//*Proceedings of 4th Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Jun 14-16,

- 2004, Trondheim, Norway.
- [3] IEEE P1547 Std IEEE standard for distributed resources interconnection with electric power systems. 2004.
- [4] BOLIK S M. Grid requirements challenges for wind turbines//*Proceedings of Fourth International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms*, Oct 20-21, 2003, Billund, Denmark.
- [5] ERLICH I, BACHMANN U. Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany//*Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*; Vol 2, Jun 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 2230-2234.
- [6] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed ind-energy generation. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 1996, 143(3): 231-241.
- [7] 刘其辉,贺益康,赵仁德.变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制. *电力系统自动化*, 2003, 23(20): 62-67.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 23(20): 62-67.
- [8] 苑国锋,柴建云,李永东.变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究. *中国电机工程学报*, 2005, 25(8): 90-94.
YUAN Guofeng, CHAI Jianyun, LI Yongdong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(8): 90-94.
- [9] 伍小杰,柴建云,王祥珩.变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述. *电力系统自动化*, 2004, 28(23): 92-96.
WU Xiaojie, CHAI Jianyun, WANG Xiangheng. Overview of AC excitation for variable speed constant frequency doble fed wind power generator systems. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(23): 92-96.
- [10] LEDESMA P, USAOLA J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 388-397.
- [11] HOLDSWORTH L, WU G, EKANAYAKE J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2003, 150(3): 343-352.
- [12] KAZACHKOV Y, FELTES J W, ZAVADIL R. Modeling wind farm for power system stability studies//*Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*; Vol 3, Jul 13-17, 2003, Toronto, Canada: 1526-1533.
- [13] THIRINGER T, LUOMI J. Comparison of reduced-order dynamic models of induction machines. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(1): 119-126.
- [14] DERBEL D N, KAMOUN M B A, PLOLOUJADOFF M. On the order reduction of induction machine during start-up. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1995, 10(4): 655-660.
- [15] 尹明,李庚银,周明.双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较. *电力系统自动化*, 2006, 30(13): 22-27.

- YIN Ming, LI Gengyin, ZHOU Ming. Analysis and comparison of dynamic models for the doubly fed induction generator wind turbine. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(13): 22-27.
- [16] HE Yikang, HU Jiabing, ZHAO Rende. Modeling and control of wind-turbine used DFIG under network fault conditions// *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*; Vol 2, Sep 27-29, 2005, Nanjing, China; 986-991.
- [17] NIIRANEN S S, ARKKIO J. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance power systems. *IEEE Trans on Power Systems*, 2006, 21(4): 1782-1789.
- [18] RATHI M R, MOHAN N. A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating in weak grids// *Proceedings of IEEE 2005 31st Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Nov 6-10, 2005, Raleigh, NC, USA; 2481-2486.
- [19] 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// *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Jun 18-22, 2006, Montreal, Canada.
- [20] 胡家兵,孙丹,贺益康. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制. *电力系统自动化*, 2006, 30(8): 21-26.
HU Jiabing, SUN Dan, HE Yikang. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under Grid voltage dip. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(8): 21-26.
- [21] SEMAN S, NIIRANEN J, KANERVA S, et al. Analysis of a 1.7 MVA doubly fed wind-power induction generator during power systems disturbances// *Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Jun 14-16, 2004, Trondheim, Norway.
- [22] DITTRICH A, STOEVE A. Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with DFIM generators// *Proceedings of 11th European Conference on Power Electronics and Applications*, Sep 11-14, 2005, Dresden, Germany.
- [23] MORREN J, DE HAAN S W H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 435-441.
- [24] 李建林,赵栋利,李亚西,等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的 Crowbar 对比分析. *可再生能源*, 2006(5): 57-60.
LI Jianlin, ZHAO Donglin, LI Yaxi, et al. Analyze of crowbar circuit for variable speed constant frequency doubly fed induction generator. *Renewable Energy*, 2006(5): 57-60.
- [25] ABBEY C, JOOS G. Short-term energy storage or wind energy applications// *Proceedings of Conference Record of the Industry Applications Conference*; Vol 3, Oct 2-6, 2005, Hong Kong, China; 2035-2042.
- [26] PETERSSON A, LUNDBERG S. A DFIG wind-turbine ride-through system influence on the energy production// *Proceedings of Nordic wind power conference*, Mar 1-2, 2004, Helsinki, Finland.
- [27] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 29-36.
- [28] PIWKO R, MILLER N, SANCHEZ-GASCA J, et al. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines// *Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition; Asia and Pacific*, Aug 14-18, 2005, Dalian, China.
- [29] LI Yu, GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, et al. LVRT capability of wind turbine generator and its application to regional power grid// *Proceedings of 5th World Wind Energy Conference*, Nov 6-8, 2006, Delhi, India.
- [30] 迟永宁,王伟胜,刘燕华. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响. *电力系统自动化*, 2006, 30(15): 10-14.
CHI Yongning, WANG Weisheng, LIU Yanhua. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(15): 10-14.

王伟(1976—),男,博士研究生,高级工程师,从事风力发电机组控制系统研制、电力电子在电力系统中的应用研究。E-mail: wangwei@nari-china.com

孙明冬(1983—),男,硕士研究生,主要从事变速恒频风力发电机组控制系统研究、电力电子在电力系统中的应用研究。

朱晓东(1970—),男,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制研究、电力电子在电力系统中的应用研究。

Analysis on the Low Voltage Ride Through Technology of DFIG

WANG Wei, SUN Mingdong, ZHU Xiaodong

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the wind power supply sharply increasing in some areas, the effects of large scale wind farms on the stability of regional power system are becoming very remarkable. Accordingly, more and more studies are focusing on the low voltage ride through (LVRT) technology used for doubly fed induction generators(DFIGs). In this paper, the LVRT concept and relevant international standards are first introduced. And then it introduces various modeling methods, popular LVRT technologies and improved control strategies. In the end, the effects of wind farms with LVRT capability on the power systems are analyzed.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No.2006BAA01A22).

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); wind power; low voltage ride through (LVRT)

附录 A

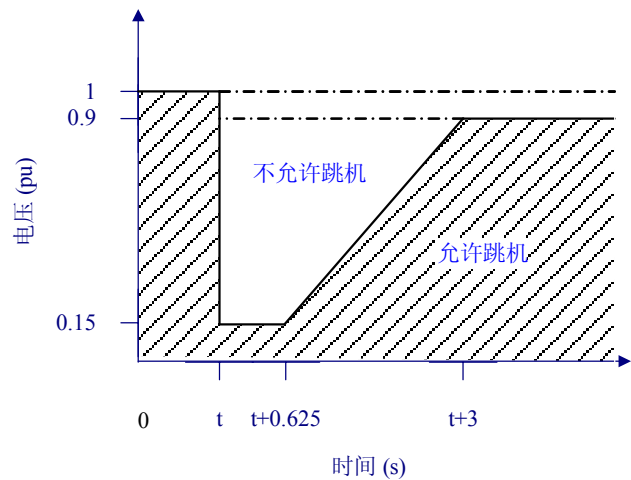


图 A1 E.ON Netz 低电压穿越标准示意图

Fig. A1 E.ON Netz requirements for wind park behavior during faults

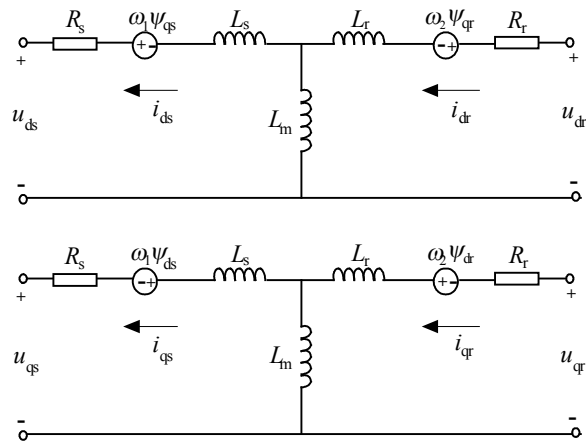


图 A2 双馈发电机在 d,q 坐标系下的等效电路图

Fig. A2 DFIG model in $d-q$ reference frame

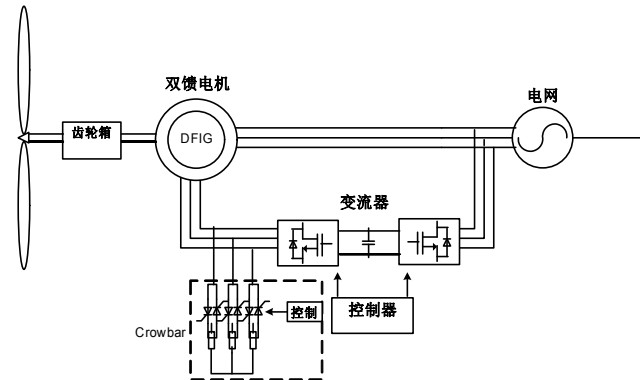


图 A3 加入 crowbar 电路的双馈电机系统原理图

Fig. A3 DFIG equipped with crowbar circuit

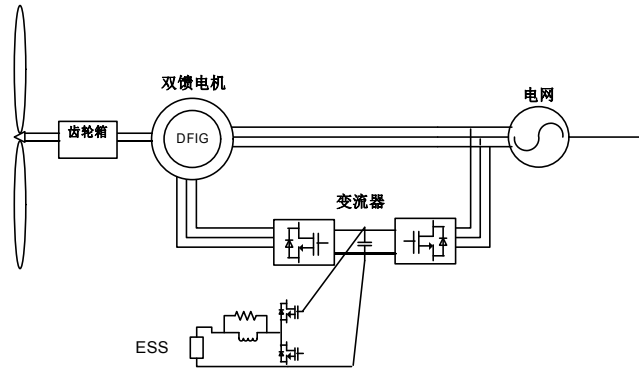


图 A4 加入能量储存系统的双馈电机系统原理图

Fig. A4 DFIG equipped with energy storage system

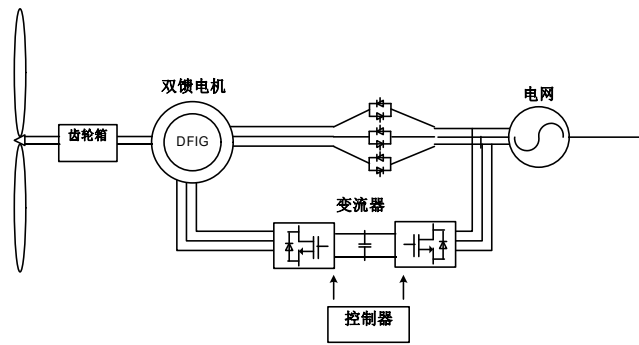


图 A5 加入定子侧电子开关的双馈电机系统原理图

Fig. A5 DFIG equipped with stator switch