

风力发电低电压穿越技术综述

张兴¹, 张龙云¹, 杨淑英¹, 余勇², 曹仁贤²

(1. 合肥工业大学电气工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥阳光电源有限公司, 合肥 230088)

摘要: 近年来风力发电占供电比重增长迅速。在电网出现故障导致电压跌落后, 风力机组如果纷纷解列会带来系统暂态不稳定, 并可能造成局部甚至是系统全面瘫痪, 故人们开始关注风机并网并相应提出了低电压穿越(LVRT)要求。文中详细分析了定速异步风机(FSIG)、同步直驱式风机(PMSG)和双馈式风机(DFIG)三种主要机型在电网电压跌落时的暂态特性, 并综述了国内外提出的主要LVRT方案。重点分析了最难实现穿越的双馈风机的LVRT方案。

关键词: 风力发电; 电压跌落; 低电压穿越; 定速异步机; 同步直驱; 双馈风机; 撬棒

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2008)02-0001-08

Low Voltage Ride-through Technologies in Wind Turbine Generation

ZHANG Xing¹, ZHANG Long-yun¹, YANG Shu-ying¹, YU Yong², CAO Ren-xian²

(1. School of Electrical Engineering, Hefei University
of technology, Hefei 230009, China;

2. Hefei Sungrow Power Supply Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In recent years, the proportion of the wind power in the grid is increasing rapidly. When the grids faults results in voltage decline, the widespread tripping of wind generators could lead to transient instabilities and local or overall blackouts. So it is concerned that the wind turbines merge into the grid, and the request of the low voltage ride through (LVRT) ability is proposed. This paper analyses the transient responses of three widely used wind turbine, including fixed speed induction generator (FSIG), permanent magnetic synchronous generator (PMSG) and doubly-fed induction generator (DFIG), and summarizes the LVRT methods adopted home and abroad. The LVRT methods of DFIG are mainly discussed; which is most difficult.

Key words: wind turbine generation; voltage dip (sag); low voltage ride through (LVRT); fixed speed induction generator (FSIG); permanent magnetic synchronous generator (PMSG); doubly-fed induction generator (DFIG); crowbar

当今世界风电市场发展迅猛, 风电场装机容量逐年上升, 尤其是在欧美的一些发达国家, 风力发电所占电网供电比例已经非常高, 如丹麦已超过20%。因此, 必须考虑电网故障时风机的各种运行状态对电网稳定性的影响^[1,2]。为此各国电网公司依据自身实际对风电场/风电机组并网提出了严格的技术要求。包括低电压穿越能力、无功控制能力、有功功率变化率控制和频率控制等。其中LVRT被认为是风电机组设计制造控制技术上的

最大挑战, 直接关系到风机的大规模应用。

低电压穿越LVRT, 指在风机并网点电压跌落的时候, 风机能够保持并网, 甚至向电网提供一定的无功功率, 支持电网恢复, 直到电网恢复正常, 从而“穿越”这个低电压时间(区域)。

电压跌落会给电机带来一系列暂态过程, 如出现过电压、过电流或转速上升等, 严重危害风机本身及其控制系统的安全运行。一般情况下若电网出现故障风机就实施被动式自我保护而立即解列, 并

不考虑故障的持续时间和严重程度,这样能最大限度保障风机的安全,在风力发电的电网渗透率(即风力发电占电网的比重)较低时是可以接受的。然而,当风电在电网中占有较大比重时,若风机在电压跌落时仍采取被动保护式解列,则会增加整个系统的恢复难度,甚至可能加剧故障,最终导致系统其它机组全部解列,因此必须采取有效的 LVRT 措施,以维护风场电网的稳定。

目前市场上风机类型可概括为三类,即直接并网的定速异步机 FSIG(fixed speed induction generator)、同步直驱式风机 PMSG(permanent magnetic synchronous generator)和双馈异步式风机 DFIG(doubly-fed induction generator)。本文就这三种风机类型分析电网电压跌落引起的暂态过程,综述了目前一些主要的 LVRT 实现方案,并重点讨论了 DFIG 的 LVRT 方案。

1 LVRT 功能简介

LVRT 是对并网风机在电网出现电压跌落时仍保持并网的一种特定的运行功能要求。不同国家(和地区)所提出的 LVRT 要求不尽相同^[3,4]。在德国北部,风机密度很高,电网运营商 E.ON Netz 对风电场/风力机组的 LVRT 要求如图 1 所示。

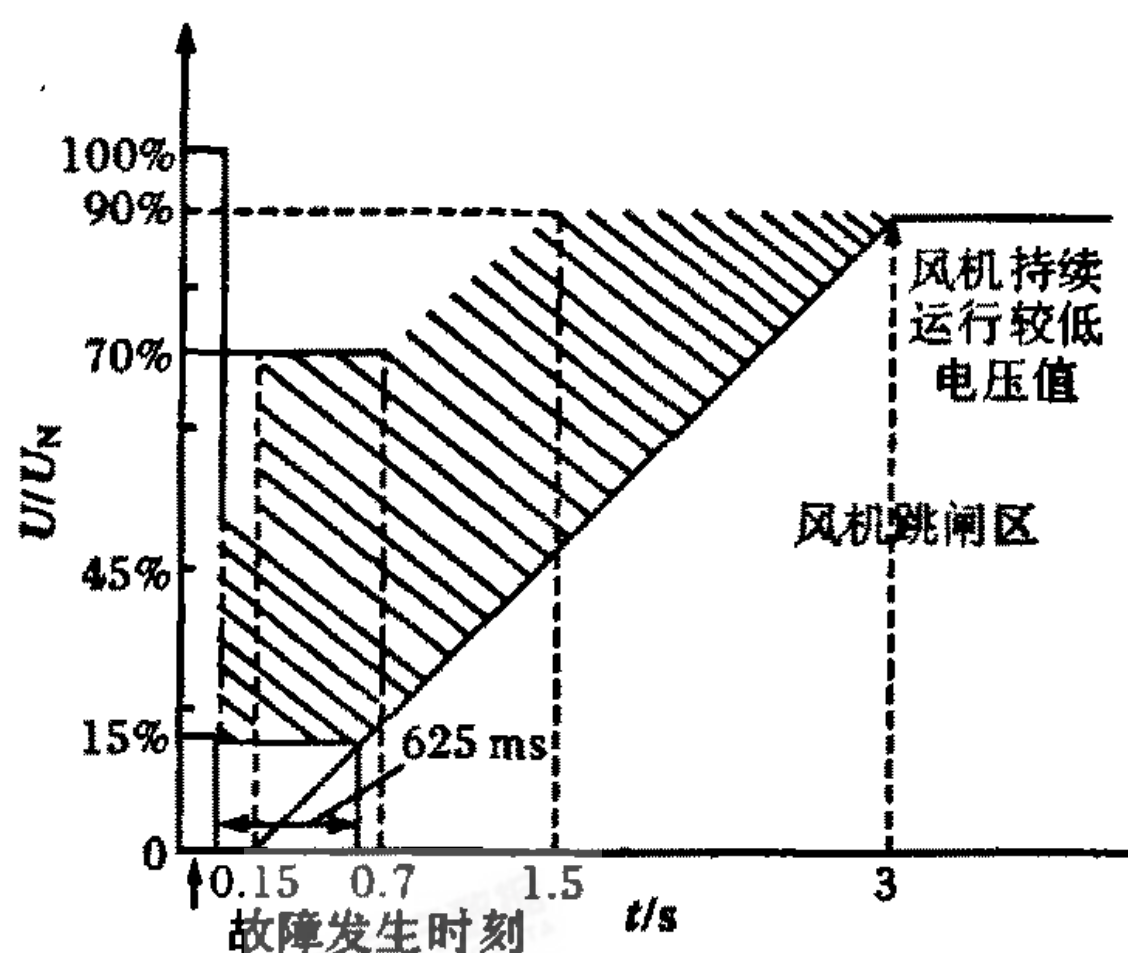


图 1 德国 E.ON Netz 公司的 LVRT 要求
Fig. 1 LVRT requirements of E.ON Netz

仅当电网电压在时间或数值上处于图示曲线下方时,风机才允许解列;而在曲线以上区域,风机应保持并网,等待电网恢复。且当电压位于图中阴影区域时,还要求风机向电网提供无功功率支撑,帮助电网恢复。

在图中可以看到,当电压跌落到 15% ~ 45% 时,要求风机一直提供无功支持,并应能保持并网至少 625 ms。而在电压跌落到 90% 以上时风机应

一直保持并网运行。

2 电压跌落对不同风机的影响

研究 LVRT 的前提是分析风机在电网电压出现跌落与恢复时的一些暂态过程。不同风机类型的暂态和导致的影响不尽相同。

图 2 所示为目前市场上广泛使用的三种主要的风机拓扑:FSIG;定子经变流器并网的 PMSG;DFIG。

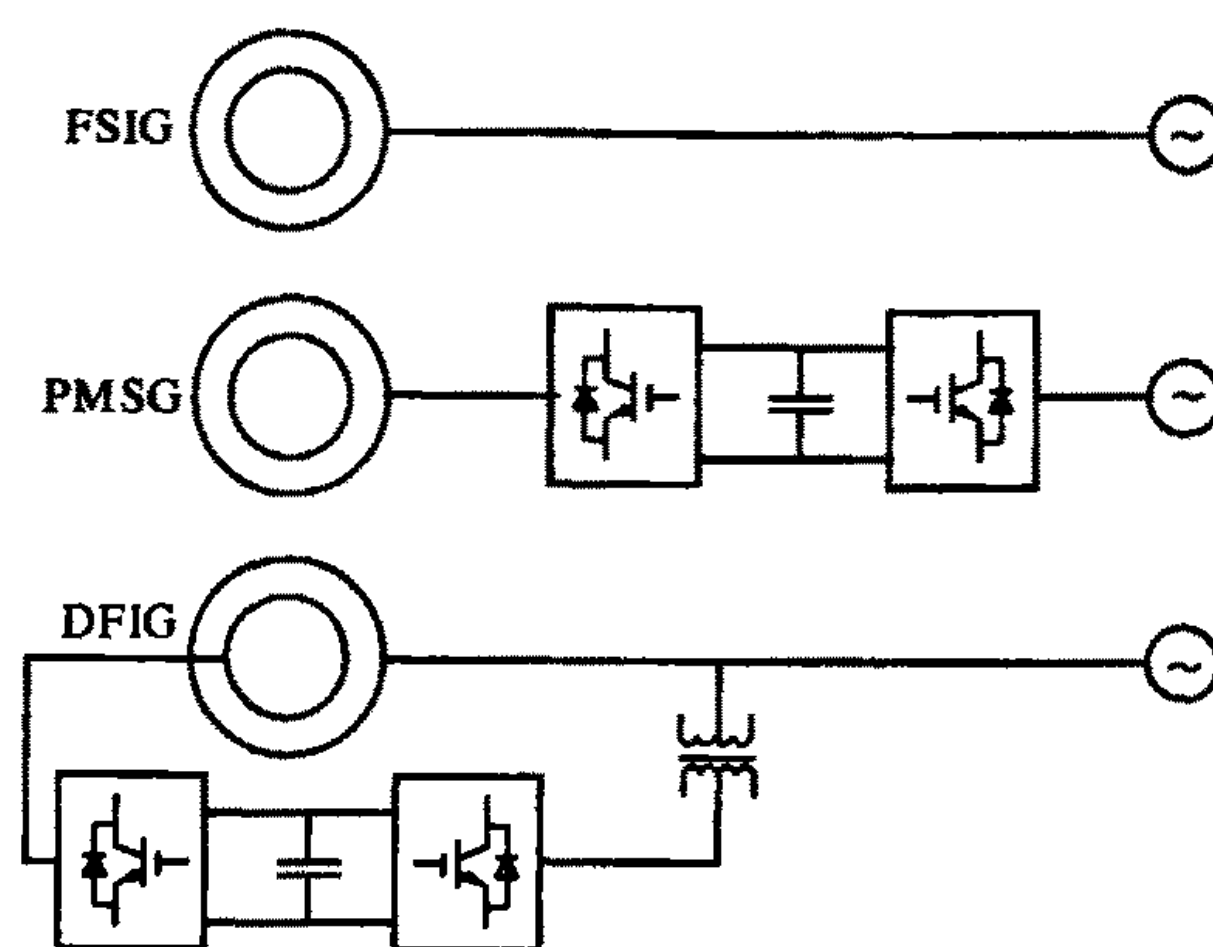


图 2 三种主要的风机类型
Fig. 2 Three main types of the wind turbines

2.1 FSIG 和 DFIG 的暂态现象

FSIG 和 DFIG 都是定子侧直接联接电网。这种直接耦合使得电网电压的降落直接反映在电机定子端电压上,导致定子磁链出现直流成分,不对称故障时还会出现负序分量。定子磁链的直流量和负序分量相对于以较高转速运转的电机转子会形成较大的转差(转差频率分别在 ω_s 和 $2\omega_s$ 附近, ω_s 为同步角频率),从而感生出较大的转子电势并产生较大的转子电流,导致转子电路中电压和电流大幅增加^[5,6]。

对于 FSIG,从电压跌落到恢复的时间内,其鼠笼式转子能承受此短时过电流而不会受损烧毁^[7];而 DFIG 转子侧接有 AC/DC/AC 变换器,其电力电子器件的过压、过流能力有限。如果对电压跌落不采取控制措施限制故障电流,较高的暂态转子电流会对脆弱的电力电子器件构成威胁^[5,6];而控制转子电流会使变流器电压升高,过高的电压一样会损坏变流器^[8];且变流器输入输出功率的不匹配有可能导致 DC-link(直流用线)电压的上升或下降(与故障时刻电机超同步速或次同步速有关^[7])。因此 DFIG 的 LVRT 实现较为复杂。

电网发生故障(尤其是不对称故障)的过渡过

程中,电机电磁转矩会出现较大的波动,对风机齿轮箱等机械部件构成冲击,影响风机的运行和寿命。定子电压跌落时,电机输出功率降低,若对捕获功率不控制,必然导致电机转速上升^[5~7]。在风速较高即机械动力转矩较大的情况下,即使故障切除,双馈电机的电磁转矩有所增加,也难较快抑制电机转速的上升,使双馈电机的转速进一步升高,吸收的无功功率进一步增大,使得定子端电压下降,进一步阻碍了电网电压的恢复,严重时可能导致电网电压无法恢复,致使系统崩溃^[9,10],这种情况与电机惯性、额定值以及故障持续时间有关。

2.2 PMSG 的暂态现象

对于 PMSG,定子经 AC/DC/AC 变流器与电网相接,发电机和电网不存在直接耦合。电网电压的瞬间降落会导致输出功率的减小,而发电机的输出功率瞬时不变,显然功率不匹配将导致 DC-link(直流母线)电压上升^[7,11,12],这势必会威胁到电力电子器件安全。如采取控制措施稳定 DC-link 电压,必然会导致输出到电网的电流增大,过大的电流同样会威胁变流器的安全。当变流器直流侧电压在一定范围波动时,电机侧变流器一般都能保持可控性,在电网电压跌落期间,电机仍可以保持很好的电磁控制。所以同步直驱系统的 LVRT 实现相对 DFIG 而言较为容易^[13]。

3 LVRT 的实现方法

3.1 FSIG 的 LVRT 实现

电压跌落期间 FSIG 的主要问题是电磁转矩衰减导致转速的飞升。其简单的结构使得能采取的措施也很有限。最简单的方法是在可靠判断出故障后,利用快速变桨来减小输入机械转矩,限制转速上升^[5,7]。但风机桨叶具有很大的惯性,该方案需要风机有很好的变桨性能。

变桨控制不足之处在于无法提供无功以支持电网恢复,鼠笼电机的运转反而需要吸收电网的无功。一般减少无功吸收的方法是按最大功率输出安装电容器组。但在风力发电这种能量波动大的场合会带来系统电压的波动,且会磨损发电机械,故障时临近母线会出现过电压,因此文献[14]提出采用静态无功补偿 SVC(static var compensator)方案,安装一个静态无功补偿器,实时补偿所需无功。研究结果显示,稳态运行波形得到改善,提高了故障穿越能力。

文献[16]提出采用静态同步补偿器

STACOM(voltage source static var compensator)来调节电压,其研究结果显示在适当的额定功率下,该方案可以实现低电压穿越。与静态无功补偿器相比,该方法的补偿电流不依赖于连接点电压,所以补偿电流在电压下降时不会降低。然而,由于成本的原因,这一方案难以工程化。

总的来说,DFIG 在电压跌落时面临的问题不是很大,其 LVRT 实现可以配合变桨和其他措施实现。

3.2 PMSG 的 LVRT 实现

电压跌落期间 PMSG 的主要问题在于能量不匹配导致直流电压的上升。可采取措施储存或消耗多余的能量以解决能量的匹配问题。这种设计的效果需要考虑成本、电网规范以及故障深度和时间。

可以考虑从变流器设计入手^[11],选择器件时放宽电力电子器件的耐压和过流值,并提高直流电容的额定电压。这样在电压跌落时可以把 DC-link 的电压限定值调高,以储存多余的能量,并允许网侧逆变器电流增大,以输出更多的能量。但是考虑到器件成本,增加器件额定值是有限度的,而且在长时间和严重故障下,功率不匹配会很严重,有可能超出器件容量,因此这种方法较适用于短时的电压跌落故障。

上面的方法考虑增大功率输出和储能以解决功率匹配。同样可以考虑减小电机的发电功率来平衡功率^[11,12]。

如减小同步机电磁转矩设定值,这样会引起发电机的转速上升,从而达到允许转速的暂时上升来储存风机部分输入能量,这有效地减小了发电机的输出功率。如果故障不严重,可以不采取变桨控制;一旦电机转速上升过多或不使用上升转速来储存能量可以直接采取变桨控制。变桨可从根本上减小风机的输入功率,有利于电压跌落时的功率平衡。这种策略结合增加器件容量的方法可进一步提高穿越裕度。

对于更长时间的深度故障,可以考虑采用额外电路单元储存或消耗多余能量。文献[7,11]给出两种外接电路单元实现 LVRT 的方案,如图 3 所示。图 3(a)为在 DC-link 上接一个储能系统,当检测直流电压过高则触发储能系统的 IGBT,转移多余的直流储能,故障恢复后将所储存的能量馈入电网。图 3(b)采用 Buck 变换器,直接用电阻消耗多余的 DC-link 能量。

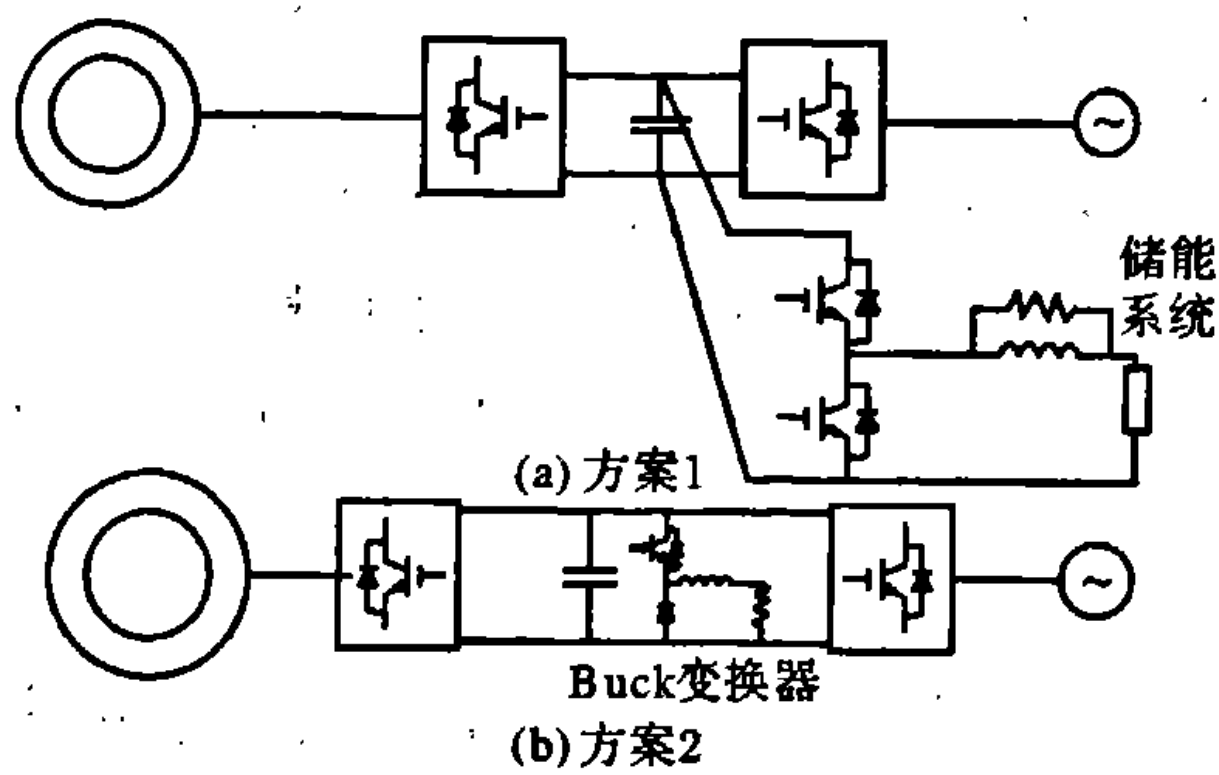


图 3 两种用于 PMSG 的 LVRT 方案
Fig. 3 Two LVRT implementations in PMSG

3.3 DFIG 的 LVRT 实现

与前两种机型相比,DFIG 在电压跌落期间面临的威胁最大。电压跌落出现的暂态转子过电流、过电压会损坏电力电子器件,而电磁转矩的衰减也会导致转速的上升。

由于 DC-link 会出现过、欠电压,因此可以考虑与 PMSG 一样在 DC-link 上接储能系统,以保持 DC-link 电压稳定^[7]。这种基于能量管理的控制方案主要是从维持 AC/DC/AC 变流器直流母线电压的角度考虑问题,没有直接涉及到双馈电机本身的 LVRT 特性。

文献[18]考虑定子磁化电流的动态过程,建立精确模型及相应的控制策略来减小暂态过电流。通过在转子电压方程中加入补偿项实时修正模型中的动态量以达到补偿效果,提高电压波动时的动态响应。而文献[19]针对不对称故障引起的二次谐波设计了含有重复控制器的锁相环以滤除负序分量,提高了 LVRT 能力。文献[20]指出故障过电流引起控制失败原因在于常规线性控制策略的局限性,由此设计了一个非线性控制方案,提高了 LVRT 能力。

除此以外,下面重点介绍几种典型的 LVRT 实现方案。

3.3.1 基于双馈电机定子电压动态补偿的控制策略

电网电压跌落时,定子磁链中出现的直流分量和负序分量会在转子电路中感生出较大的电势,频率分别为 ω 和 $\omega + \omega'$ (ω 为同步角速度, ω' 为转子角速度)。由于转子电路的漏感和电阻值较小,较大的电势必然在转子电路中产生较大的电流。

为削弱定子磁链的变化对转子电路的影响,可

采用对磁链进行动态补偿控制的方案,即通过控制发电机的漏磁链以抵消定子磁链中的暂态直流、负序分量对转子侧的影响^[6,21,31]。定转子间磁链的关系如式(1)所示:

$$\Psi_r = \frac{L_m}{L_s} \Psi_s + \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} I_r \approx \Psi_s + (L_{sl} + L_{rl}) I_r \quad (1)$$

式中: Ψ_r 为转子磁链; L_m 为励磁电感; Ψ_s 为定子磁链; L_s 为定子电感; L_r 为转子电感; L_{sl} 为定子漏感; L_{rl} 为转子漏感; I_r 为转子电流。

因此,在故障情况下可以通过对转子电流的控制,使转子电流的方向位于定子磁链的直流分量和负序分量相反的方向上,如图 4 静止坐标系下的统一相量 - 矢量图所示^[6],图中转子电流实际代表了转子漏磁链量,从而可以在一定程度上削弱甚至消除定子磁链对转子磁链的影响。

相对于电压跌落引起的感应电动势,变流器能提供多大的电压支持很关键。在相同条件下,电压下跌时电机运行于超同步速比次同步速需要更高的转子端电压;定子电压跌落越大,转子电流控制所需转子端电压也越大,对转子电流的控制也就越困难;在故障发生时重载比轻载时的控制困难,而对于无功功率,控制电压随无功电流的增加而减小。增大电流控制环的带宽,能有效抑制动态过渡过程中转子电流的峰值^[22]。

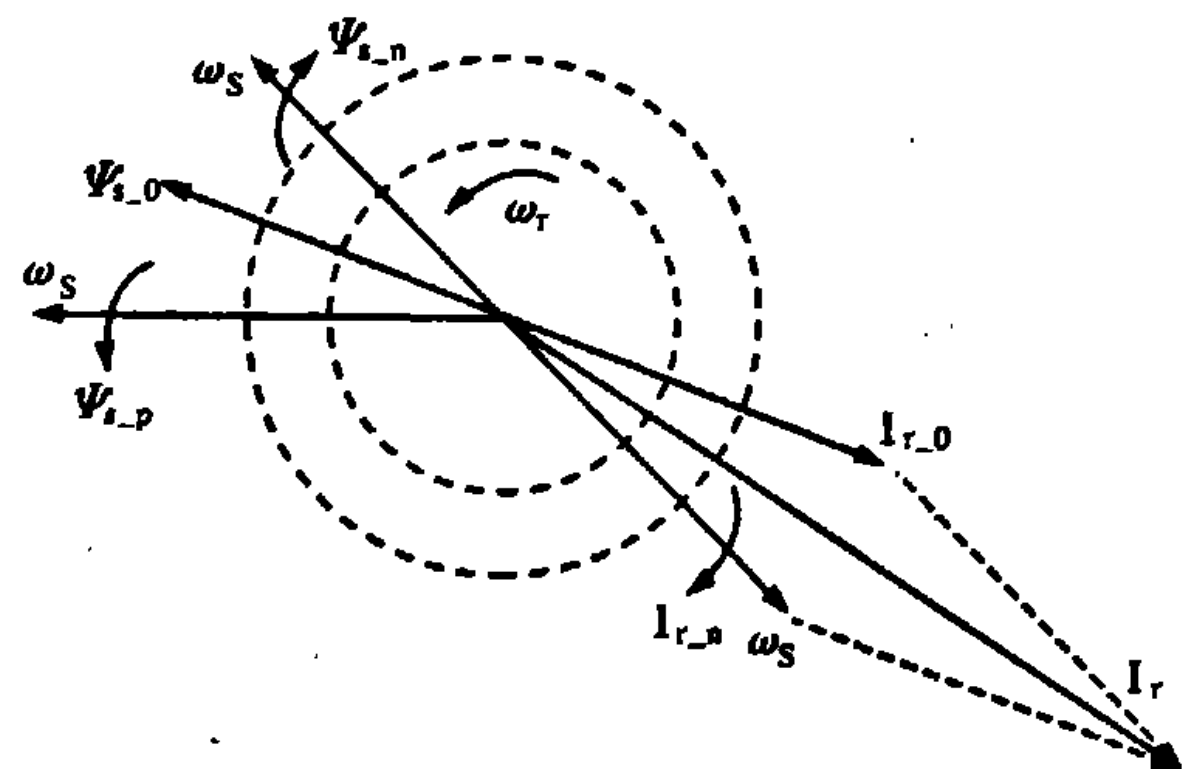


图 4 转子电流的控制
Fig. 4 Control of the rotor current

图中: $\Psi_{s,n}$ 为定子磁链正序分量, $\Psi_{s,0}$ 为定子磁链直流分量, $\Psi_{s,p}$ 为定子磁链负序分量, $I_{r,0}$ 为转子电流直流分量, $I_{r,n}$ 为转子电流负序分量。

此外由式(1)不难分析,变流器利用转子电流对转子磁链变化的补偿能力受定子和转子漏感的影响,漏感越大,这种补偿控制能力越强,即 LVRT 能力越强;反之 LVRT 能力也就越弱。

3.3.2 基于转子撬棒(crowbar)的LVRT控制策略

撬棒技术是较早用于DFIG转子变流器保护的技术,分为被动撬棒和主动撬棒。被动撬棒即所谓的“晶闸管(SCR)”撬棒^[23],电网出现故障到一定限值就触发转子撬棒,从而保护风机。其控制完全是一种自我保护形式的撬棒类型,不对故障电网电压提供支撑,并且在电网故障切除后也不能立即对电网恢复供电。

对风机更高的要求催生了可控关断的“主动撬棒”,利用强迫换流功能的SCR、GTO、IGBT等可关断器件代替晶闸管撬棒电路中的晶闸管^[23]。常用的有两种主动撬棒,如图5所示^[23,24]。

需要保护时即触发双向开关,将旁路电阻接入双馈电机转子回路中。旁路电阻阻值的选取较为重要,阻值过小不能起到限制转子电流的作用;阻值过大又会在转子变流器转子侧带来过电压,起不到保护转子变流器的作用^[24]。另外撬棒动作后双馈电机的稳态运行特性不仅和转子回路接入的撬棒电阻大小有关,还受电网电压跌落程度的影响。

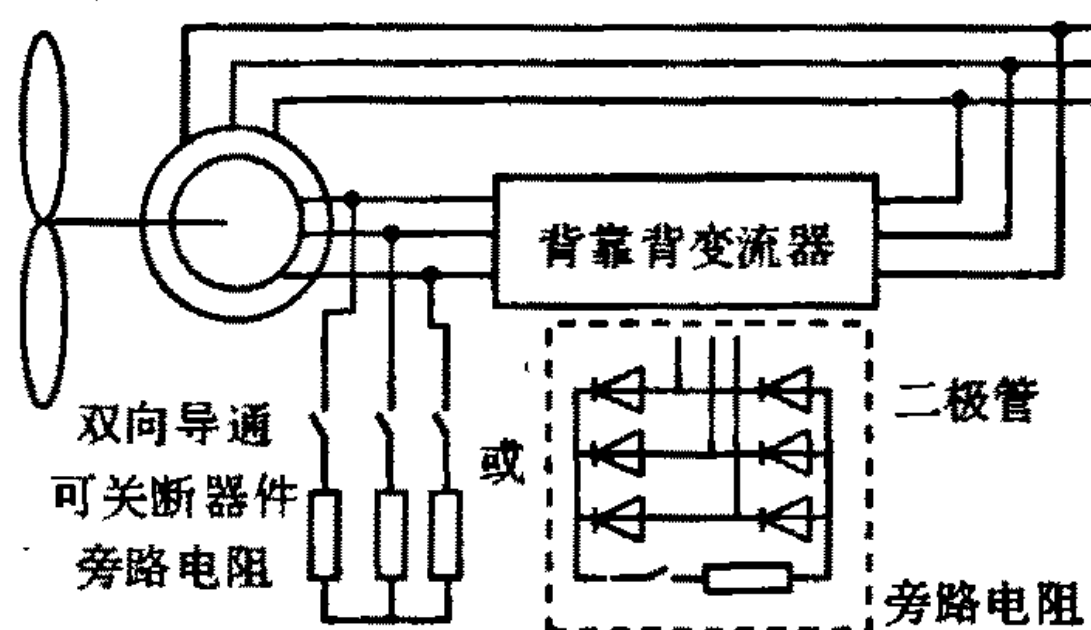


图5 主动撬棒
Fig. 5 Active crowbar

电压跌落会导致转速飞升,文献[9]提出紧急变桨控制方案,使风力机的桨距角以 $5^\circ/\text{s}$ 的速度迅速增加,使得风力机的输出机械转矩迅速降低,从而减缓双馈电机的转速上升速度,进而减少了故障切除后电网电压恢复时双馈电机从电网吸收的感性无功功率,减少对电网电压恢复的阻碍作用。但该文献仅从减少吸收无功功率的角度分析问题,而忽视了双馈电机及其转子侧变流器本身对电网电压的控制作用。

撬棒动作后,电机的运行状态类似于传统的基于笼型异步电机的FSIG。当双馈电机转子电流和转子变流器直流电压降低到设定保护值以下时,需要重新恢复对双馈电机的控制,双馈电机从笼型电机的恒速运行状态到双馈电机的变速运行状态。文

献[25]指出撬棒切除时会产生较大的电流振荡过程,这一状态的切换需要一定的逻辑顺序和相应的控制策略,否则可能会引起双馈电机撬棒保护电路的再次动作,因此需要对两种不同运行状态之间的切换过程进行严密的逻辑规划,既照顾到有功功率和风力发电机转速的控制,又要兼顾到双馈电机无功功率的控制,以支撑电网的稳定性^[8,26,27]。

文献[5,27,28]通过定子功率因数控制,实现了对DFIG定子吸收无功的控制,从而减小了发电机对电网电压恢复的影响,甚至对电网电压恢复起到一定支撑作用。

3.3.3 短暂中断的LVRT控制策略

转子撬棒控制能满足电网故障情况下不脱离电网的要求,但该策略存在着三个主要的缺点:

① 撬棒动作后,DFIG以传统的FSIG特性运行,成为一个消耗感性无功的负载,不能起到对电网电压的控制作用,且阻碍故障切除后电网电压的恢复^[9,29];

② 双馈电机不同运行状态间的切换,需要较为复杂的控制逻辑,否则可能会引起较大的振荡过程^[24];

③ 撬棒动作后,DFIG仍有较大的振荡过程,较大的振荡会影响机械传动轴、齿轮箱等机械部件的安全运行和寿命^[9]。

为此,文献[29]提出了“短暂中断STI(short term interruption)”的概念,将低电压穿越特性划分为四个区域,如图6所示。

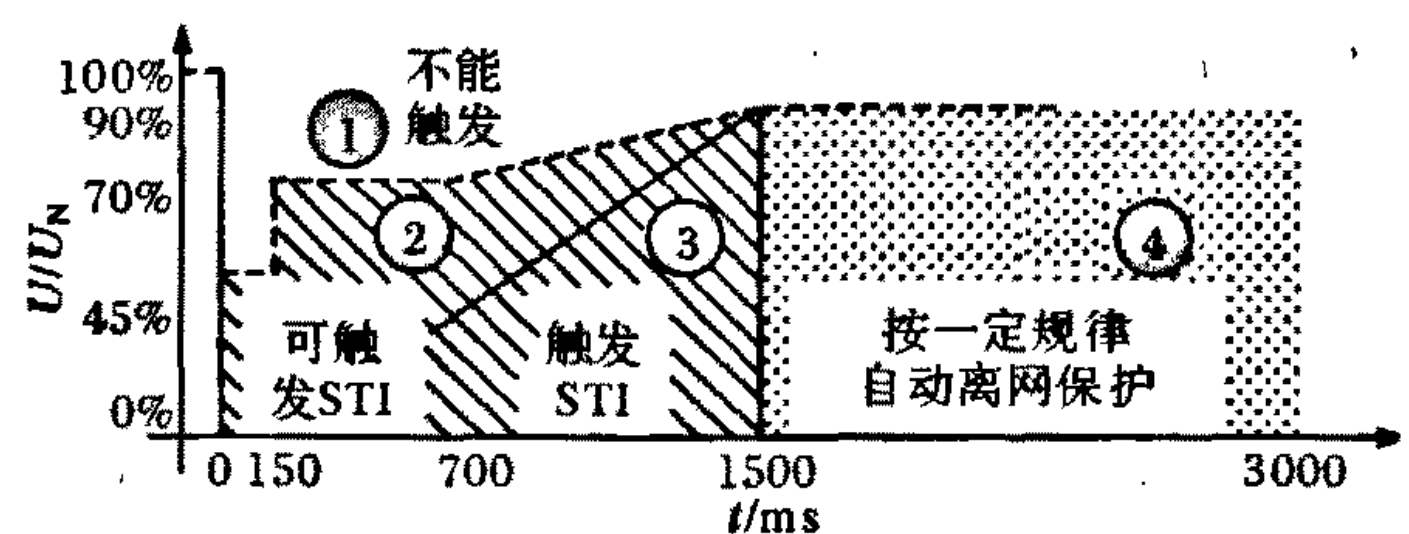


图6 文献[28]定义的LVRT要求
Fig. 6 Definition of LVRT requirements
in references[28]

在区域1和区域2中风力发电机必须保持并网状态,但是当电网电压跌落至区域2时,如果出现过载、稳定性等技术难题时,允许短暂脱离电网,即实施STI控制;当电网电压跌至区域3时,采用STI控制;当电网电压跌落至区域4时,风力发电机按照一定规律脱离电网,进行自我保护。基于STI控制方案的双馈电机控制的拓扑结构如图7

所示。

图中, CU(commutation unit) 为换向单元, SSW(stator side switch) 为定子侧反并联晶闸管。在电网电压恢复时一旦出现过流现象, 则双馈电机定子侧晶闸管 SSW 被阻止, 使得双馈电机定子能在 10 ms 之内从电网脱离^[30]。在定子与电网脱离后, 触发定子侧换向单元, 并且转子变流器停止工作, 这时双馈电机的转子电路通过 IGBT 反并联二极管与直流母线相连, 从而和定子侧换向单元共同起着强迫双馈电机去磁的作用, 以利于双馈电机在脱离电网后快速实施再次并网操作^[29]。图中转子撬棒电路起到备用保护作用, 防止过渡过程中直流母线电压过高。

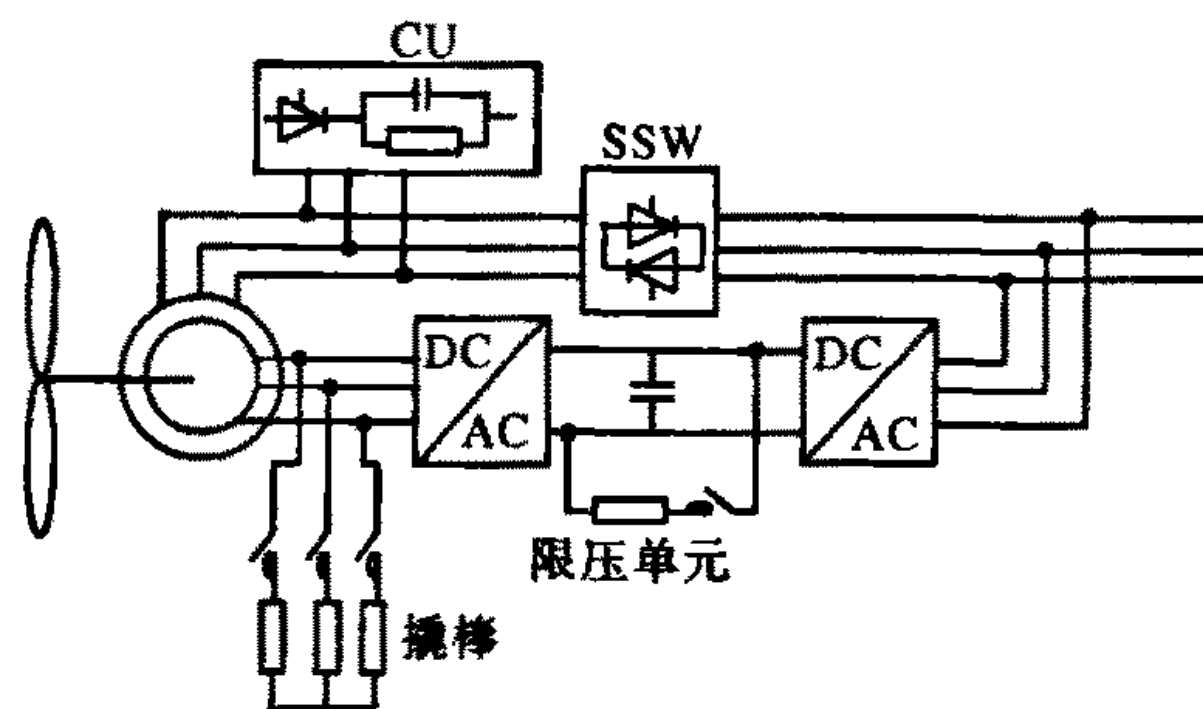


图 7 基于 STI 方案的 LVRT 拓扑结构

Fig. 7 Structure of LVRT method based on STI

基于 STI 的这一方案虽然能够很好避开双馈电机的振荡过程和消耗电网无功功率的不利影响, 但这一控制策略需要解列后再并网, 这一过程通常需要 200 ~ 300 ms 的时间, 在这一时间内发电机和电网之间完全没有无功功率和能量的交换, 也就失去了对电网电压的控制作用, 尤其在故障期间, 不利于电网的稳定。

文献[30]提出通过提高转子变流器 IGBT 功率电子器件的电流容量, 使转子变流器能够在短期内处理更大的电流, 避开在故障发生时, 即电网电压跌落时的 STI, 仅在电网电压恢复时, 可能触发 STI 动作。这一方案即避免了由于撬棒保护电路的动作所产生的不利后果, 又使得在电网故障期间, 转子变流器能够快速的恢复对双馈电机定子侧和电网之间的有功功率和无功功率交换的控制作用。

4 结语

本文分析了目前风力发电机主要的三种机型 (FSIG, PMSG, DFIG) 在电网电压出现跌落时的暂态过程, 并综述了国内外提出的一些 LVRT 实

现措施, 其中重点分析了 DFIG 的控制策略。对于这三种机型, FSIG 属于淘汰机型, 以后的发展趋势是 PMSG 和 DFIG。PMSG 由于定子经变流器接电网, 与电网解耦, 因此电网电压的降落不会对发电机有大的影响, 但仍会影响网侧变流器的运行, 这就要求网侧变流器能实现 LVRT; DFIG 转子侧接变流器, 容量只有整机的 20% ~ 40%, 但在电网跌落期间由于会引起发电机磁链的动态过程, 需要有复杂的控制措施以实现其 LVRT 能力。

对风机的 LVRT 要求增加了风力发电成本。一味地严格要求风机通过 LVRT 特性曲线测试不一定是适宜的。文献[7]分析显示, 对于接入点短路容量大的强系统, 故障时电压跌落低, 没有多强 LVRT 能力的风机也能实现穿越, 因此没必要对并网的风机要求很高的 LVRT 能力, 从而降低成本; 而对接入点短路容量小的弱系统, 故障时电压也许会跌得很低, 需要并网风机有很好的 LVRT 能力, 而太弱的系统要求过高也不现实。在风电场规划设计阶段, 有必要慎重选择并网点, 并对风机提出实际的 LVRT 要求。

总之 LVRT 的研究仍是风力发电系统今后一段时间关注的热点问题。

参考文献:

- [1] Chai Chompoo-inwai, Lee Wei-jen, Fuangfoo P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.
- [2] 樊艳芳 (Fan Yanfang). 电压不平衡与风电厂运行之间相互影响的研究 (Analysis of the interaction between voltage unbalance and wind power plant operation) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2002, 14(4): 58-60, 71.
- [3] Case C. Connecting Wind Farms to the Grid-what You Need to Know[R]. Vancouver, Canada; 2006.
- [4] Erdman W, Behnke M. Low Wind Speed Turbine Project Phase II: the Application of Medium-voltage Whitaker (BEW) Engineering San Ramon [R]. California, USA; 2005.
- [5] Holdsworth L, Wu X G, Ekanayake J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3): 343-352.
- [6] Xiang D W, Li R, Tavner P J, et al. Control of a

- doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2006, 21(3): 652-662.
- [7] Abbey C, Joos G. Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability [C] // 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, USA, 2005.
- [8] Morren J, de 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.
- [9] Sun T, Chen Z, Blaabjerg F. Voltage recovery of grid-connected wind turbines with DFIG after a short-circuit fault [C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany; 2004.
- [10] Sun T, Chen Z, Blaabjerg F. Transient stability of DFIG wind turbines at an external short-circuit fault [J]. *Wind Energy*, 2005, 8(3): 345-360.
- [11] Ottersten R, Petersson A, Pietilainen K. Voltage sag response of PWM rectifiers for variable-speed wind turbines [EB/OL]. www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/044%20-%20Andreas%20Petersson.pdf.
- [12] Morren J, Pierik J T G, De Haan S W H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines [C] // 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, UK; 2004.
- [13] Abbey C, Li W, Owatta L. Power electronic converter control techniques for improved low voltage ride through performance in WTGs [C] // 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 18-22 June 2006, Jeju, South Korea; 2006.
- [14] Chai Chompoo-inwai, Chitra Yingvivanapong, Kittipong Methaprayoon, *et al.* Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance [J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2005, 41(3): 666-672.
- [15] 王立伟, 房大中, 钟德成 (Wang Liwei, Fang Dazhong, Zhong Decheng). 含静止无功补偿器的电力系统混合仿真新算法研究 (A new hybrid simulation algorithm for power system with static VAR compensator) [J]. *电力系统及其自动化学报 (proceedings of the CSU-EPSA)*, 2004, 16(1): 74-77, 82.
- [16] Molinas M, Vazquez S, Takaku T, *et al.* Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a STATCOM: an experimental verification [C] // 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands; 2005.
- [17] 颜楠楠, 江全元, 邹振宇 (Yan Nannan, Jiang Quanyuan, Zou Zhenyu). SVC 和 STATCOM 交互影响分析及单神经元控制器设计 (Interactions and single neuron controller design of SVC and STATCOM) [J]. *电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA)*, 2005, 17(3): 63-68.
- [18] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等 (Hu Jiabing, Sun Dan, He Yikang, *et al.*). 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制 (Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip) [J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2006, 30(8): 21-26.
- [19] Timbus A V, Teodorescu R, Blaabjerg F, *et al.* PLL algorithm for power generation systems robust to grid voltage faults [C] // 2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, South Korea; 2006.
- [20] 向大为, 杨顺昌, 冉立 (Xiang Dawei, Yang Shunchang, Ran Li). 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究 (System simulation of a doubly fed induction generator ride-through control for symmetrical grid fault) [J]. *中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)*, 2006, 26(10): 130-135.
- [21] 向大为, 杨顺昌, 冉立 (Xiang Dawei, Yang Shunchang, Ran Li). 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略 (Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault) [J]. *中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)*, 2006, 26(3): 164-170.
- [22] 贺益康, 何鸣明, 赵仁德, 等 (He Yikang, He Mingming, Zhao Rende, *et al.*). 双馈风力发电机交流励磁用变频电源拓扑浅析 (Analysis on the frequency converter served for the AC excitation of wind-power DFIG) [J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2006, 30(4): 105-112.
- [23] Niiranen J. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar [C] // Proceedings of Nordic Wind Power Conference, Chalmers University of Technology, Sweden; 2004.
- [24] Morern J, De Haan S W H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip [J]. *IEEE Trans on Energy*

Conversion, 2005, 20(2): 435-441.

[25] Zhan C, Barker C D. Fault ride-through capability investigation of a doubly-fed induction generator with an additional series-connected voltage source converter [C] // The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, London, UK; 2006.

[26] Abbey C, Morneau J, Mahseredjian J, *et al.* Modeling requirements for transient stability studies for wind parks [C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada; 2006.

[27] 李建林, 许鸿雁, 梁亮, 等 (Li Jianlin, Xu Hongyan, Liang Liang, *et al.*). VSCF-DFIG 在电压瞬间跌落情况下的应对策略 (Strategy to cope with the VSCF-DFIG during voltage dip)[J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2006, 30(19): 65-68.

[28] Ekanayake J B, Lee Holdsworth L, Wu X G, *et al.* Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.

[29] Erlich I, Winter W, Dittrich A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the German transmissions system [C] // 2006 IEEE Power

Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada; 2006.

[30] Petersson A, Lundberg S, Thiringer T. A DFIG wind turbine ride-through system. Influence on the energy production[J] Wind Energy, 2005, 8(3): 251-263.

[31] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. Wind-turbine fault ride-through enhancement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1929-1937.

作者简介:

张 兴(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子与电力传动, 目前主要从事大功率风力发电用并网变流器、轻型直流输电及大型光伏并网发电等方面的研究。Email: honglf@ustc.edu.cn

张龙云(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动, 目前主要从事风力发电用矩阵变换器方面的研究。Email: zhanglongyun2002@163.com

杨淑英(1980-), 男, 博士, 主要从事电力电子与电力传动, 目前主要从事大功率风力发电用并网变流器及逆变器并联运行等方面的研究。Email: yangsyhfah@sina.com

曹仁贤(1968-), 男, 博士, 博士生导师(兼), 目前正主持国家“十一五”科技支撑项目“大型风机电控及变流技术”和国家“十一五 863”重大项目“兆瓦级光伏并网电站示范”。Email: crx@sps.com.cn

图参考下列要求修改

一、图的要求

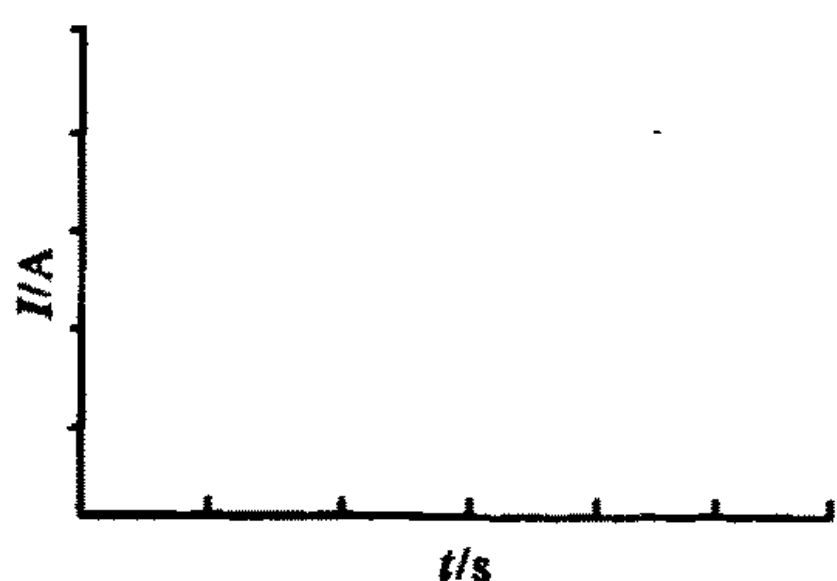
1. 印刷出版图:

一般尽量排单栏(≤8cm), 复杂的图单栏排不下时可排双栏(宽<16cm), 图字为6号。要求图线粗细适当、光滑清晰, 图的长宽比例稀疏程度适当(紧凑)。图及字都要清楚美观。各种电路元件图要符合国家标准, 箭头要标准(不要过大或成叉形)。

2. 原稿上的图:

要求清楚美观, 紧凑, 图字的大小与图的大小要匹配, 以便缩放。(不应图大字小, 缩后图字看不清, 图小字大, 缩放后仍不匹配)图线要光滑, 不要成锯齿形。

3. 图的坐标刻度必须清楚, 且数字大小要适当, 坐标的名称及单位标法如:



坐标的物理量符号为斜体, 单位为正体, 放在坐标中间, 并注意大、小写。

4. 图内的外文字要分清正斜体, 特别是曲线图上的外文字, 大、小写, 正、斜体要注正确。

外文正体

(1) 所有计量单位、词头和量纲符号。

(2) 数学式中的运算符号, 缩写号、特殊函数符号和某些特殊的集符号等。

(3) 量符号中为区别于其它量而加的具有特定含义的非量符号下角标。

(4) 化学元素符号。

(5) 仪器、元件、样品等的型号或代号。

(6) 不表示量符号的外文缩写字。

(7) 表示序号的拉丁字母。

5. 计算机下载的窗口图要清楚, 不要一片灰蒙蒙的, 图中的字要非常清楚。