变速恒频风力发电机组控制技术综述

宋卓彦，王锡凡，滕予非，宁联辉，张 钦
（西安交通大学电气工程学院，陕西省西安市 710049）

摘要：对国内外风电接入电网的输电网技术规范进行了分析和比较，明确了风电机组的控制要求及对应的控制目标。重点阐述了双馈感应异步发电机（DFIG）和多极直驱式永磁同步发电机（PMSG）2 类变速恒频（VSCF）风电机组的拓扑及以最大功率点跟踪（MPPT）为目标的控制方案，其中主要对 PMSG 的控制方案进行了总结和比较；结合输电网技术规范对风电机组的控制要求，说明了 VSCF 风电机组在低电压穿越（LVRT）时的控制方案及保护措施，同样以分析 PMSG 的 LVRT 控制方案及相应保护措施为主。最后简要介绍了风电机组以提高电能质量、调频能力为目标的研究现状，并对采用分频输电技术的分频风力发电系统进行了探讨。

关键词：风力发电；输电网技术规范；矢量控制；最大功率点跟踪；低电压穿越；分频输电技术

0 引言

近 10 年来，全球的风电装机容量保持了高速增长，欧洲、北美和亚洲是 3 个主要市场。截至 2008 年底，欧洲风电总装机容量达到了 65.9 GW，比 2007 年增长了约 15%，风能满足了欧盟约 4.2%的用电需求。根据欧盟委员会最新的规划，到 2020 年风电装机要达到 230 GW，以满足欧盟地区 14%～18%的电力需求[1]。这与美国能源部提出的风力发电建设规划[2]不谋而合。由文献[2]可知，美国的风力发电装机容量 2004 年占新增装机容量的不到 2%，至 2008 年已经提高到 42%，目前美国的风力发电量已经占到总发电量的 1.26%。中国的风电虽然起步较晚，但截至 2008 年底，风电装机已经达到 12.2 GW，按照目前的发展速度，在 2010 年将有可能超越西班牙和德国，风电总装机容量跃居世界第 2 位。根据世界风能委员会的预测，到 2020 年全世界的电力消耗将有 12%来自风力发电[3]。随着风电装机在系统中比重的增大，风电对系统的影响也越发明显。

风电对系统的影响[4-5]主要体现在电能质量方面，包括电压变化、谐波、闪变 3 个方面的内容。此外，还体现在对电网可靠性的影响，其中又包括了短期影响和长期影响。短期影响有备用、输电阻塞（输电网效率下降）、常规机组效率降低、减排等方面，长期影响主要是指对发电容量充裕度的影响，一般从风电机组容量可信度的角度进行说明[6-7]。结合系统对风电的要求[4,8-12]以及风电对系统的影响，对风电的控制包括有功和无功功率输出、风电场运行范围、电压调节、低电压穿越（low voltage ride through，LVRT）、电能质量等方面。

在世界范围内，欧洲、北美的风电技术处于领先地位，文献[8-11]给出了欧洲、美洲国家（地区）的风电接入电网的输电网技术规范。北欧国家的风电普及水平最高，德国风电的装机容量又是全欧洲最多的；另外，由于北美电力系统自身电力市场的构成以及输电网所有权的分散，造成与风电相关的部分标准仍在起草或更新中[10]。因此，本文只选取北欧、德国以及中国关于风电接入电网的相关输电规范进行比较，明确了系统对风电（场）机组的控制要求及对应的控制目标；然后结合输电规范，主要对 2 类变速恒频（variable speed constant frequency，VSCF）风电机组，即双馈感应异步发电机（doubly fed induction generator，DFIG）和多极直驱式永磁同步发电机（permanent magnet synchronous generator，PMSG），以最大功率点跟踪、LVRT 为目标的控制方案进行研究，最后介绍了风电机组的其他控制目标和分频（变速变频）风电系统的研究进展。

1 风电机组的控制目标

针对风电机组自身的标准和风电（场）机组所接入电网的输电网技术规范共同形成了对风电机组的控制要求。本节总结了风电机组的控制要求，进而得到相应的控制目标。

1.1 风电机组标准

IEC 61400 系列标准是目前国际上最为通用的

收稿日期：2009-12-07；修回日期：2010-02-10。
国家自然科学基金资助项目（50777052）。

风电机组标准,国内目前沿用的风电机组标准大部分是由国际电工委员会(IEC)标准转化而来,例如目前使用的 GB/T 20320—2006《风电机组电能质量测量和评估标准》与 IEC 61400-21 是一样的;即使是德国使用的 FGW(2002)标准,除了在数据采集上有所区别,其测量、评估风电机组的方法和流程与 IEC 61400-21 在本质上也是一致的[4]。这一系列标准很多,涉及到风力发电机的装配和安装、风电场的监控、机械载荷测试、机组认证以及风力发电机组的安全要求、电能质量等各个方面。

1.2 风电接入电网的输电网技术规范

随着单机容量的增大以及风电场规模的不断扩大,风电场产生的电能通过(超)高压输电网进行传输的要求越来越迫切。如前所述,由于电力系统中的配置、风电在系统中所占比重以及电网调度对风电的不同要求,而且,电力市场机制在风力发电运营中的引入使得原本就非常复杂的互联规则更加难以制定,因此,国际上目前还没有关于风电场接入电力系统的通用标准。为了规范接入系统的风电,各个国家(地区)分别根据自身情况制定了与风电机组相关的输电网技术规范[4,8-12]。

在 2007 年,为了更有效地整合北欧的电力市场,提高供电质量和系统可靠性,北欧的电力调度系统供应商共同形成了北欧输电网技术规范[8],对接入 110 kV 以上、420 kV 以下输电线路的风电作了具体要求,该规范目前应用于挪威、瑞典、芬兰和丹麦 4 个北欧国家。欧洲最大的电力公司——德国 E.ON 公司于 2006 年制定了针对(超)高压的输电网技术规范[9],对接入系统的可再生能源作了具体要求,适用的电压等级为 110 kV～380 kV。中国电力科学研究院与丹麦合作,目前已经起草了适用于 110(66) kV 以上电压等级的《风电场接入电力系统技术规定》(2009 修订稿)[12]。

目前国内外对于风电接入电网规范进行比较的文献很少[4,11,13],一方面是因为各个国家、地区相关规定的差异很大——电力系统配置上的区别、风电在系统中所占比重不同,另一方面是因为风电的装机保持着高速的增长,各地区对接入系统的风电会经常提出新的要求,从而导致相关技术规定在持续更新。考虑到国内《风电场接入电力系统技术规定》(2009 修订稿)对风电场无功功率补偿、调峰调频能力、保护配置等要求的缺失,本节将只从风电场运行区域和 LVRT 要求两方面与北欧和德国的输电网技术规范进行比较。

从附录 A 图 A1 可以看出,北欧对接入系统的风电机组要求最严格,要求能够运行在47.5 Hz～53.0 Hz,电压(标幺值)为 0.85～1.10;E.ON 公司要求风电机组运行在 47.5 Hz～51.5 Hz,电压为 0.9～1.1;国内要求风电机组能运行在 48 Hz～51 Hz,运行电压为 0.9～1.1。超出上述范围后,允许风电机组退出运行。

附录 A 图 A2 表示系统对风电机组的 LVRT 要求。以电网侧发生最严重的三相对称接地短路故障为例,且假定故障前并网点电压为额定值,风电机组在故障发生时输出的有功功率为额定值。其中德国 E.ON 公司的要求相对复杂:在 Line1 以上,不允许机组切出;在 Line1 与 Line2 之间,允许个别机组短时切出。国内允许并网点电压最低为 0.2(这与美国、西班牙、意大利的相关标准基本一致[11]),而北欧和德国的规范甚至允许并网点电压突降至 0 并持续一段时间。需要指出的是,上述规范基本上是对风电(场)机组的最低要求,允许各地的电力调度系统运营商根据实际情况适当修改标准。

由上可见,国内的《风电场接入电力系统技术规定》(2009 修订稿),无论是对允许运行的频率范围、LVRT 能力,还是切出风电机组的有功功率恢复率等方面,标准都相对偏低。这是因为目前风能在国内能源结构中所占的比例较低,电网自身的调节能力能够应对风电的间歇性和随机性所带来的影响。随着国内风电比例的提高,风电接入电网的相应标准也将趋于严格。实际上,在北欧、德国的输电网技术规范和美国的标准中,如果没有特别说明,已经在很多方面要求风电场具备与常规发电机组同样的性能[8-11]。

1.3 风电机组的控制要求与控制目标

通过上面的分析,根据电网对所接入风电的要求和 IEC 的风电机组标准,对风电机组的控制要求可总结为:①正常运行情况下,尽可能提高风电机组的利用效率;②风电机组要保持在低电压运行期间(一般持续 0.75 s～3.00 s[11])不与电网断开连接,并尽可能提供无功功率以协助电网电压恢复;③满足 IEC 标准中对电能质量的要求;④频率稳定能力,可以在一定的频率范围内保持并网运行,一些国家还要求风电机组具备一定的调频能力(爱尔兰的输电网技术规范草案 ESBNG 要求风电机组具有额定功率 3%～5%的一次调频能力[4]),即能够根据系统要求,独立控制风电机组的有功、无功功率。

因此,对应于上述控制要求的控制目标为:①最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT);②提升风电机组的 LVRT 性能;③提高风

电机组的电能质量；④提高控制水平，以增强风电机组的调频能力。目前的研究主要是围绕前2个控制目标展开的，下面将对实现这2个控制目标的控制方案进行详细说明，对于后2个控制目标，本文仅进行简单介绍。

2　风电机组以MPPT为目标的控制方案

文献[14]指出了风电机组在正常运行情况下针对不同风速的3种控制策略：①功率优化策略。在风速低于额定时调节转速，使风力机运行在最佳叶尖速比，以尽可能地捕获风能。②限制功率为额定值的策略。风速等于或高于额定值时调节桨距角，保持转速在额定值附近，此时风电机组发出的功率为额定功率；风速大于切出风速时，控制风电机组退出运行。③限制功率为给定值的策略。特殊情况下要求风电机组能够根据系统调度的要求，独立地控制有功、无功功率，或是具备一定的调频能力。本节只对VSCF风电机组实现MPPT目标的控制方案进行讨论，又因为对DFIG的研究开始较早，对其控制方案的研究相对成熟，这里主要阐述PMSG实现MPPT目标的控制方案。

此外VSCF风电机组的控制可分为2部分：机械部分(桨距角)控制和电气部分(变流器)的控制。其中：通过对桨距角的控制可调整捕获的风能，进而控制发电机转速；对桨距角的控制可以通过计划增益[15-16]或模糊控制方法实现[17-18]，且在第3种控制策略或LVRT情况下，要求变流器输出功率控制与桨距角控制能够相互协调。

2.1　DFIG变流器拓扑与控制方案

DFIG约有20%～30%的功率(转差功率)通过变流器传输[19-20]，其中变流器容量较小，相比于全功率变流器，在经济性上具有优势。文献[21]了给出DFIG变流器的3种典型拓扑形式：①转子侧变流器采用二极管不可控整流，网侧变流器使用晶闸管进行逆变。这种拓扑控制简单，可靠性高，但会在转子侧和网侧产生谐波。②背靠背双脉宽调制(PWM)的变流器拓扑。由于使用全控型器件，功率能够双向流动，谐波含量少，采用矢量控制技术能够实现发电机的有功、无功解耦控制，是目前应用最为普遍的一种拓扑形式。③采用矩阵变流器的拓扑。矩阵变流器作为交交变频器，使用的器件较交直交变频器多，且承受的电压高，也不能进行输入、输出的解耦控制，目前已基本上被交直交变频器所取代[22]。

目前DFIG采用背靠背双PWM变流器的拓扑，且使用矢量控制[20,22-24]的常用控制方案为：转子侧变流器采用定子磁链定向矢量控制，实现MPPT控制目标；网侧变流器通过电网电压定向矢量控制，保持直流链电压U_{DC}为常数和无功功率为0。

2.2　PMSG变流器拓扑与控制方案

2.2.1　PMSG变流器拓扑

PMSG变流器有多种拓扑[21]，其控制方案受拓扑形式的影响很大。机侧变流器(machine side converter，MSC)可以采用二极管，即机侧不控整流＋boost变换＋网侧逆变器的拓扑；也可以采用全控型器件[21,25-26]。网侧变流器(grid side converter，GSC)在早期主要使用晶闸管，目前新建的风电机组以背靠背双PWM变流器拓扑为主。下面对PMSG常用的拓扑以及它们的特点进行简要说明。

1)MSC使用二极管，GSC使用晶闸管。这种拓扑控制简单，可靠性高，在经济性上具有优势。但也正是因为机侧采用不可控整流，导致定子谐波含量增大，影响发电机的效率和使用寿命；同时由于GSC使用晶闸管，会在网侧产生很大的谐波，须在变流器末端添加无功补偿装置。

2)MSC使用二极管，GSC使用绝缘栅双极晶体管(IGBT)或可关断晶闸管(GTO)。与上面的拓扑一样，控制简单，可靠性高，但也具有发电机的利用效率低的缺点；由于在网侧使用了全控型器件，功率能够双向流动，可以省去无功补偿装置。

3)MSC和GSC同时使用IGBT或GTO。由于两侧变流器都采用全控型器件，能够大幅提高PMSG的效率；缺点是全控型器件比较昂贵，控制算法复杂，且需要增加过电压、过电流保护措施。

此外，直流链使用不同的结构也对PMSG的拓扑造成影响[21,25]。

随着风力发电机容量的增大，还出现了多电平背靠背、并联背靠背双PWM变流器等拓扑[25,27]。

2.2.2　PMSG的控制方案

下面的分析是基于PMSG采用背靠背双PWM变流器的拓扑进行的。根据文献[28-29]给出的PMSG动态模型，以MPPT为目标，采用常规矢量控制的变流器控制方案，根据侧重点不同，附录B大致归纳了单位功率因数控制、最小损耗控制、最大转矩控制、常定子电压控制、GSC控制有功和无功功率5种控制方案[30-40]，并对这5种控制方案的优缺点进行了比较。下面对附录B进行简要说明，其中定子电流d轴、q轴分量分别用i_{sd}和i_{sq}表示。

1)若MSC采用转子磁链定向矢量控制，则i_{sq}只与电磁转矩T_e相关：$i_{sq}=2T_e/(3p\Psi_{PM})$(其中：$p$

为极对数,Ψ_{PM}为永磁磁链),即可以通过控制 i_{sq}的值,控制发电机的电磁功率(考虑电机损耗),进而控制发电机输出的有功功率以实现 MPPT。若采用定子磁链定向,则定子电压 U_s 中只有 d 轴分量,即 $U_s=U_d$,$U_q=0$。

2)最小损耗控制[32]。电机损耗是由铜耗、铁耗、机械损耗和整流器损耗 4 部分组成。机械损耗与电机的转速和运行状态有关,因此不可控,且目前的研究往往忽略变流器损耗,因此最小电机损耗实际上是对电机铜耗、铁耗的最小化,可由最小电机损耗与 i_{sd}的函数得到 i_{sd}的参考值。本文对 GSC 馈入网侧的有功功率进行测量,该值近似等于发电机定子发出的有功功率,与通过 MPPT 算出的有功功率进行比较后,经过比例积分(PI)环节可得 i_{sq}的参考值。

3)最大转矩控制[33-36]和常定子电压控制[37-39]。最大转矩控制方案以发电机转速为输入量,通过 MPPT 算法得到最大转矩或有功功率,即全部定子电流用来产生电磁转矩,且保持 i_{sd}为 0,目前国内的研究文献中应用较多;常定子电压控制方案在国外研究文献中应用较多,需要注意的是,这种控制方案使用定子电压定向的矢量控制,因此控制器通过 i_{sd}控制有功功率,从而实现对风能最大限度的利用。

4)GSC 控制有功、无功功率。如果忽略变流器损耗,当直流链电压保持恒定时,认为经由直流链的有功功率完全流入电网,即 $P_{网侧}=P_{DC}=U_{DC}I_{DC}$,则对有功功率和对直流链电压的控制可以互换。Michalke 由此提出采用通过 GSC 控制有功、无功功率的控制方案[29-30,40],即 MSC 采用与常定子电压控制方案同样的矢量控制,保持直流链电压 U_{DC}及定子电压 U_s 为常数;作用在 GSC 上的控制器通过电网电压定向矢量控制,控制有功功率并保持无功功率为 0。

5)因为 PMSG 的转子没有阻尼绕组和励磁绕组,在受到干扰(风速、负荷突变或网侧发生故障)时不能提供有效的阻尼,容易引起传动轴振荡。需要添加阻尼控制器,利用直流链电压 U_{DC}对振荡的阻尼作用,在传动轴振荡时给 U_{DC}补偿一个相反方向的振荡偏移量,起到阻尼振荡的效果[29-30,40]。

3 LVRT 时风电机组的控制方案和保护

根据输电网技术规范对风电机组的控制要求可知,VSCF 风电机组在网侧发生故障时的控制目标为:在保证风电机组自身安全的前提下,尽可能向网侧提供无功支持,提高其低电压穿越性能,以满足当地输电网技术规范的要求。文献[9]特别指出,故障情况下当并网点的电压低于 0.5 时,要求风电机组变流器输出的无功电流达到 1。这说明在故障情况下,风电机组对电网电压的支持要优先于向网侧传输有功功率,此时需要调整风电机组的控制方案,对相应的控制器进行切换。

如前所述,下面的分析认为 DFIG 和 PMSG 风电机组均采用背靠背双 PWM 变流器的拓扑,并选取最严重的情况进行讨论,即假定网侧出现三相对称短路故障,风电机组故障前发出额定有功功率,故障期间风速保持恒定。

3.1 LVRT 时 DFIG 的控制方案和保护措施

故障后定子电压、磁链下降,导致转子电流增大,从而引起转子电压和直流链的电压升高,会产生转子过电流和直流链过电压,且由于 DFIG 变流器的容量较小,须对其实施保护。目前比较普遍的做法是在转子与转子侧变流器之间加装快速短接保护装置(crowbar 电路)[23,41-43]。当检测到转子过电流时,crowbar 电路动作,短接转子端部并旁路和阻断转子侧变流器。

由于在 crowbar 电路动作后,DFIG 等效为鼠笼式异步发电机,网侧变流器等效为静止同步补偿器(STATCOM)。为保证在 crowbar 电路退出工作后,机端电压能较好地恢复,避免再次出现过电流、过电压的情况,需要对 GSC 的控制器进行切换。调整后的控制方案为:以正常工况下的网侧电压为参考值,与检测到的实际值相比较,经 PI 环节,得到输出无功功率的参考值。即要求在 crowbar 电路动作后,GSC 能够最大限度地提供无功功率,从而补偿 DFIG 从电网吸收的无功功率;crowbar 电路退出工作后,GSC 切换为原来的控制器,控制无功功率为 0。

如果不对 GSC 的控制方案进行调整,而是通过添加过速保护装置[23]——故障后能够紧急调整桨距角,从而把风力机吸收的风能降低到额定值的 20%以下,也能够取得较好的 LVRT 性能,但这种控制方案需要添加额外的装置,增加了控制的复杂程度。与文献[23]不同的是,文献[27]认为在故障后无需添加额外的过速保护装置,文中指出在机端电压下降的情况下,由于机械转矩大于电磁转矩,将导致转速过快,通过调节风力机的桨距角,减小其捕获的风能,进而减小机械转矩,足以稳定风电机组的转速。又因为机械转矩的响应时间大于电磁转矩,且风电机组传动轴的转矩弹簧特性[22-23,44],故障情况下容易产生转矩振荡,为减弱转矩振荡的影响,需

要给风电机组添加阻尼控制器。

3.2　LVRT 时 PMSG 的控制方案和保护措施

PMSG 采用全功率背靠背变流器，一方面由于变流器的容量较大，能在故障时发出无功功率，对网侧电压提供支持；另一方面变流器对风电机组和电网起到解耦作用，能够减小网侧故障对风力机和发电机的冲击。因此，PMSG 相比于 DFIG 有着较好的 LVRT 能力。在目前的研究中，附录 B 中后 3 种控制方案使用较多，下面对 PMSG 在这些控制方案下的 LVRT 特性进行说明。

1）采用最大转矩控制、常定子电压控制方案（因为这 2 种方案对 GSC 的控制相同，使得 GSC 在 LVRT 时具有相同的特性，故放在一起说明）。网侧故障发生后，电网电压的瞬间降落导致输入网侧的有功功率减小，而发电机的输出功率瞬时不变，产生的多余能量对直流链电容充电，将导致电容或 GSC 过电压。为稳定直流链电压 U_{DC}，需要采取措施对多余能量进行消耗、储存或限制。常规的做法有：①给直流链添加过压保护电路[38,45-47]，这会带来系统空间安装及散热设计等问题，并且对保护电阻的投切控制需要准确的时序逻辑控制，这增加了系统的控制难度。②减小电磁转矩设定值[48]，将不平衡功率转移到风力机和发电机两侧，利用旋转元件具有较大的惯性，能对不平衡功率起到缓冲作用；但同时也会引起发电机转速上升，如果故障持续时间较长，还要考虑增大桨矩角以限制风力机吸收的风能。这种做法需要在网侧发生故障时切换控制器，调整控制方案。

在网侧发生故障时，上述 2 种控制方案的做法均对变流器的保护有利，但有一个问题需要注意：故障期间，由于网侧电压下降导致 GSC 的终端电压下降，这严重影响了 GSC 控制器的控制能力（为维持直流链电压 U_{DC} 稳定，变流器电流将很快达到其限值[40]），文献[45,48]的仿真结果也说明了这一点。虽然文献[46]提出将 GSC 运行在 STATCOM 模式，但由于 GSC 的很大一部分电流要用于维持 U_{DC} 的稳定，变流器能够提供的无功功率有限，从而不能完全发挥全功率变流器在 LVRT 时对电网电压提供支持的优势。

2）采用附录 B 中最后一种控制方案：GSC 控制有功、无功功率。PMSG 机组在故障时，在直流链两侧同样有不平衡能量对其充电，由于 MSC 要控制直流链电压 U_{DC} 为给定值，则 MSC 电流的有功分量降低，导致定子电流降低，进而发电机发出的有功功率下降。于是在直流链两侧的不平衡功率就转移到了风力机与发电机之间，如上所述，旋转元件能够对不平衡能量起到缓冲作用，且不需要对 MSC 的控制方案进行调整。

与 DFIG 的 GSC 在故障期间对其控制方案的调整相同，对 PMSG 的 GSC 控制也要进行控制器的切换，切换后的控制方案为：根据风电接入电网相关规范和网侧电压下降程度确定输出的无功功率[29,40]。因为对 U_{DC} 的控制由 MSC 实现，即 GSC 的控制器对有功功率、无功功率的控制能力在故障期间不会受到限制——使 GSC 能够以额定电流输出无功功率，从而给网侧电压提供最大程度的支持；此时 GSC 向网侧输出的有功功率为 0，即加在直流链电容上的不平衡功率最大，此时阻尼控制器（见 2.2.2 节）起到阻尼振荡的作用，但正是在它的作用下，可能导致 U_{DC} 过电压，出于对电容保护的考虑，需要在直流链添加过压保护电路[40]，这将会增加系统的控制难度。

由上，PMSG 采用 GSC 控制有功、无功功率的控制方案为：在故障期间不需调整对 MSC 的控制，且切换后的 GSC 控制器能够保证 GSC 向电网最大程度地提供无功支持。虽然这种控制方案结构复杂，控制难度较大，但综合考虑正常运行状态下 PMSG 的运行特点以及故障情况下对 LVRT 性能的提升，PMSG 采用这种控制方案效果最佳，应引起对该控制方案的重视。

3.3　LVRT 时风电机组控制方案的改进

对于 DFIG，除了将 crowbar 电路安装在转子与转子变流器之间，文献[49]提出可将 crowbar 电路安装在直流链上，并配合超级电容储能装置——双电荷层电容器（electric double-layer capacitor, EDLC）对电容器提供保护，其中 EDLC 可在直流链电压 U_{DC} 过高时吸收直流母线的功率，也可在 U_{DC} 过低时释放功率，从而维持 U_{DC} 的稳定，避免了网侧故障时，直流母线两侧的不平衡功率对电容过度充电而造成的危害。上述方案由于其成本过高，且控制复杂，在风电场的应用受到了限制，适用于单机系统。

此外，为在故障情况下更好地对电网提供支持，文献[50]还尝试提高 E. ON 公司输电网技术规范中的无功补偿标准，文中指出如果将该标准提高 1 倍，并增大变流器的容量，即当并网点电压下降 25%就要求变流器以额定的无功电流输出无功功率，且增大的这部分变流器容量全部用来输出无功功率；通过与常规方案相比较，这种在故障时以较快的速度、较大的功率输出无功功率的方法能够有效

改善并网点电压,提高系统的稳定性,可以适用于电网相对薄弱的地方,但文中没有对提高无功补偿标准与增大变流器容量之间的对应关系进行分析。目前全控型电力电子器件还比较昂贵,单纯为提高风电机组的 LVRT 性能而无限制地增大变流器容量也是不现实的。

4 风电机组其他控制目标的研究与分频风电系统

出于经济性的考虑,目前对风电机组控制的研究主要是以 MPPT 为目标展开的。如前所述,根据 IEC 风电机组标准中对电能质量的要求,以及爱尔兰、丹麦的输电网技术规范中明确要求风电机组要具备一定的调频能力[4,29],还应将提高电能质量、具备调频能力作为风电机组的控制目标;另外,针对目前 VSCF 风电系统在发展中遇到的瓶颈,分频风电系统[51]提供了一种解决的思路,本节将分别加以介绍。

4.1 风电机组其他控制目标的相关研究

4.1.1 电能质量

风电机组输出功率的波动是引起电压波动和闪变的根本原因[52],虽然通过静止无功补偿器可以维持风电场接入点电压的稳定,但它不能调节风电场输出的有功功率。目前主要的解决方法是采用储能技术平抑风电(场)机组的功率波动,如国内和日本研究的 EDLC 技术[53-56]。文献[53]提出在 PMSG 的直流链上添加由 buck boost 变换+EDLC 共同组成的储能电容系统(ECS)以改善其电能质量,在单机系统中,这种拓扑能够有效平抑风力发电机输出功率的波动,但随着风电场规模的增大,给每台风力发电机都安装 ECS 将导致成本过高、控制非常复杂。出于简化控制方案的考虑,文献[56]将 ECS 安装在风电场的终端——风电场的升压变之后,文中对 ECS 采用了模糊控制、PI 控制和 PWM 调制级联的控制方法,改善了 EDLC 的充放电性能,在平滑风电场输出电压和功率方面取得了良好的效果。除了采用超级电容储能,丹麦的可持续能源国家实验室(Risø)还研究了铅电池储能技术[57],此外还有飞轮储能、超导储能等技术,目前这些储能方式与风电的结合还处于拓展阶段。

4.1.2 调频能力

风电机组具备一定的调频能力,则需要明确风电机组对电网频率变化的响应,为此有学者进行了相关的研究[58-60]。文献[60]还给 PMSG 添加了频率控制器,在电网受到小干扰的情况下,对由 PMSG 组成风电场的调频能力进行了仿真,取得了较好的调频效果;此外,风电机组具有调频能力,这意味着在正常运行情况下需要保留一定的旋转备用(Delta 控制)或根据调度指令要求输出给定的有功、无功功率(目前 VSCF 风电机组的控制方案基本能够满足上述控制要求),因此进行风电功率预测[61-63]研究,对提升风电机组的调频能力有着重要的意义。

应当注意的是,随着风电占比的提高,对风电机组的控制将不单是为了实现 MPPT,而是为了实现多个控制目标。这些控制目标之间可能是相互制约、相互矛盾的关系,因此需要寻找既能照顾到每个目标、又能满足整体需求的控制方法,这就涉及到风力发电系统的多目标优化控制问题[16]。目前这方面的研究还较少,将是今后研究的热点。

4.2 分频风电系统

在目前的 VSCF 风电系统中,风电机组往往会遇到以下 2 个瓶颈:①效率与成本问题。降低成本、提高效率、延长寿命一直是风电机组发展所追求的目标。由于风力发电机的转速过低,对于 DFIG 需要附加多级齿轮变速箱,对于 PMSG 则需要增加发电机的极对数,这使得发电机的尺寸大、重量高、运输和安装比较困难。②风电机组与电网之间的相互影响问题。风力资源丰富的地区往往距离负荷中心较远,风电机组出力的波动给电网运行带来不利影响。

引入分频输电技术对克服上述瓶颈提供了一种新的思路。文献[51]提出了分频风电系统的概念,该系统的核心在于分频输电技术,采用该技术建立变速变频的风电系统。分频输电技术是西安交通大学王锡凡教授于 1994 年针对远距离水电开发提出的一种新型输电方式[64],其基本思想是水电机组的转速很低,适合发出频率较低(如 50/3 Hz)的电能;而输送低频电能时,线路阻抗与频率成比例下降,因此在不提高电压等级的情况下,能够大幅度提高线路的输送容量。风电通过分频输电方式传输,有以下优点:①风力发电机组的转速可以很低,这样能够减小 DFIG 变速齿轮箱的增速比或减少 PMSG 的极对数,从而减轻重量、减小尺寸、提高风电机组的效率。②采用分频输电方式,利用同样的输电线路将电能输送到更远的地区,因而便于将风电接到较强受端系统,这增强了系统的抗干扰能力,同时由于系统电抗的减小,受电端的电压波动也会相应降低。因此,分频输电方式为远距离、大容量的风电能量传输提供了一种有竞争力的输电方案[65-66]。根据美国奥巴马政府制定的可再生能源利用目标,由于规划

中的风电基地远离负荷中心(基本集中在2条海岸线上)，美国需要大力建设远距离、大容量的州际互联的输电网络[67]；而中国在西部、内蒙古进行百万级风电基地的建设，也存在着与美国同样的问题，在这种背景下引入分频输电技术同样有着重要的现实意义。

在分频风电系统中，风电场中的风电机组可以省去变流器，其发出的电能经过汇流母线收集，经升压变压器升压，再经远距离输电线路将低频电能送至交交变频器，通过交交变频器转换成工频电能送入负荷中心电网。即对于分频输电系统，通过控制一个大功率交交变频器就可以调节整个风电场发出的功率，根据风速变化调节风电机组的转速，从而实现对最大风能的追踪，风电机组可以运行在变速变频方式。目前对该系统下风电机组控制的研究还很少，主要有2种控制方案：

1)控制交交变频器低频侧的频率跟随风速变化[68]，实现最大风能的捕获。实现该控制方案需要对风速进行预测。根据预测尺度可分为短期预测(30 min～72 h)和超短期预测(一般认为在30 min以内，甚至几分钟内，主要用于风力发电控制、电能质量评估等情况[62-63])2类，对于分频风电系统，需要进一步提高超短期风速预测的精度，才能更好地实现对风电机组的控制，否则将会影响风电场的利用效率。

2)借鉴常规输电方式下风力发电系统的控制方案，实现对分频风电系统中风电机组的控制。

文献[69]对分频风电系统中DFIG的控制做了初步的工作：将由DFIG组成的风电场等值为单台DFIG，采用转子磁链定向的矢量控制技术控制风电机组的转速，在低于额定风速的情况下实现最大风能的捕获。

5　结语

本文从风电接入电网的相关规定出发，在总结国内外研究的基础上，对VSCF风电机组以MPPT和LVRT为目标的控制方案进行了较全面的综述，并简要介绍了其他2个控制目标(电能质量、调频能力)的研究情况和分频风电系统。

在今后对风力机组控制的研究中，需要注意以下几个问题：

1)通过对风电接入电网技术规范的比较可以看出，中国的标准偏低；根据美国能源部的规划，其风电功率需要通过远距离、大容量的输电网络送至负荷中心，这与中国风电规划有着类似的情况。结合中国国情，参照欧洲的风电接入电网相关标准，并关注美国风电接入电网相关标准制定的进展情况，能够对中国相关规定的修订起到借鉴作用。

2)对于VSCF风电机组，目前常用的控制方案配合变桨距技术均能实现MPPT的控制目标。需要注意的是，网侧发生故障时可通过切换控制器、加装外部保护装置实现LVRT，根据风电接入电网的相关标准，在LVRT期间，控制器的任务应调整为保证变流器能够尽可能向网侧提供无功功率，以维持网侧电压的稳定。

在中国的风力发电系统中，DFIG在风电场的使用最为广泛，其控制方案的研究也相对成熟，而PMSG的应用还较少，文献中使用的控制方案比较单一。通过对国内外PMSG常用控制方案的比较发现，Michalke提出的网侧控制有功、无功功率的控制方案，既实现了当风速低于额定值时MPPT的控制目标，又可明显提升PMSG的LVRT性能，能够比较好地满足日益严格的技术规范要求，应引起对该控制方案的重视。

3)VSCF风电机组除了要满足MPPT和LVRT的控制要求，还要满足电能质量和调频的要求，因此对储能技术、风电预测以及风力发电系统多目标的优化控制问题的研究是今后研究的热点。

此外，分频风电系统具有良好的工程应用前景，目前对风电机组在分频输电方式下的控制方案研究还刚刚起步，为进一步验证分频风电系统的优势，还需要进行大量的工作。

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

参考文献

[1] European Wind Energy Association. Winning with European wind: EWEA 2008 annual report [R/OL]. [2009-08-29]. http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/Annual_Report_2008.pdf.

[2] American Wind Energy Association. American wind energy association annual wind industry report: year ending 2008 [R/OL]. [2009-08-29]. http://www.awea.org/publications/reports/AWEA-Annual-Wind-Report-2009.pdf.

[3] World Wind Energy Association. World wind energy report 2008 [R/OL]. [2009-08-29]. http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2008_s.pdf.

[4] ACKERMANN T. Wind power in power system. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2005.

[5] THOMAS R, WANG X F. The control of large wind farm induced voltage fluctuations. IEEE Trans on Energy Conversion, 1987, 2(1): 1-8.

[6] PUDARUTH G R, LI F R. Locational capacity credit

evaluation. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 1072-1079.

[7] 吴义纯,丁明,李生虎.风电场对发输电系统可靠性影响的评估.电工技术学报,2004,19(11):72-76.
WU Yichun, DING Ming, LI Shenghu. Reliability assessment of wind farms in generation and transmission systems. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 72-76.

[8] Nordel. Nordic grid code 2007 (Nordic collection of rules) [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www. entsoe. eu/_ library/publications/nordic/planning/070115 _ entsoe _ nordic _ NordicGridCode. pdf.

[9] E. ON Netz GmbH. Grid code: high and extra high voltage [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www. eon-netzausbau. de/pages / ehn _ de / veroeffentlichungen / Netzanschluss / Netzanschlussre. geln/ENENARHS 2006 eng. pdf.

[10] KIRBY B. NERC standards process and wind power [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www. awea. org/policy/regulatory _ policy/pdf/Kirby_Summary_NERC_Standards_Process_and_Wind_Power. pdf.

[11] IOV F, HANSEN A D, SØRENSEN P, et al. Mapping of grid faults and grid codes [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www. risoe. dk/rispubl/reports/ris-r-1617. pdf.

[12] 中丹风能发展项目组.风电场接入电力系统技术规定(2009 修订稿)[EB/OL]. [2009-10-26]. http://www. dwed. org. cn/uploadfiles/2009102691848/2009-8-5%20c%20grid%20code. pdf.

[13] 雷亚洲,LIGHTBODY Gordon.国外风力发电导则及动态模型简介.电网技术,2005,29(12):27-32.
LEI Yazhou, LIGHTBODY Gordon. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation. Power System Technology, 2005, 29(12): 27-32.

[14] HANSEN A D, SØRENSEN P, IOV F, et al. Centralized power control of wind farm with doubly fed induction generators. Renewable Energy, 2006, 31(7): 935-951.

[15] BIANCHI F D, De BATTISTA H, MANTZ R J. Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. London, UK: Springer-Verlag, 2007.

[16] MUNTEANU I, BRATCU A I, CUTULULIS N A, et al. Optimal control of wind energy systems——towards a global approach. London, UK: Springer-Verlag, 2008.

[17] 廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制.中国电机工程学报,2009,29(18):71-77.
LIAO Yong, HE Jinbo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 71-77.

[18] SCHINAS N A, VOVOS N A, GIANNAKOPOULOS G B. An autonomous system supplied only by a pitch-controlled variable-speed wind turbine. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 325-331.

[19] LEI Yazhou, MULLANE A, LIGHTBODY G, et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 257-264.

[20] 刘其辉,贺益康,赵仁德.交流励磁变速恒频风力发电系统的运行与控制.电工技术学报,2008,23(1):129-136.
LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. Operation and control of AC-exited variable-speed constant-frequency wind power generation system. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 129-136.

[21] BAROUDI J A, DINAVAHI V, KNIGHT A M. A review of power converter topologies for wind generators. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2369-2385.

[22] 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.

[23] SUN T, CHEN Z, BLAABJERG F. Transient stability of DFIG wind turbines at an external short-circuit fault. Wind Energy, 2005, 8(3): 345-360.

[24] KAYIKÇI M, MILANOVIC J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 389-396.

[25] 胡书举,李建林,许洪华.永磁直驱风电系统变流器拓扑分析.电力自动化设备,2008,28(4):77-81.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis of converter configuration for direct-drive wind power system with PMSG. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 77-81.

[26] ORLANDO N A, LISERRE M, MONOPOLI V G, et al. Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 30-July 2, 2008, Cambridge, UK: 2359-2364.

[27] 李建林,高志刚,胡书举,等.并联背靠背 PWM 变流器在直驱型风力发电系统的应用.电力系统自动化,2008,32(5):59-62.
LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of parallel back-to-back PWM converter on the direct-drive wind power system. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 59-62.

[28] HANSEN A D, IOV F, SØRENSEN P, et al. Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www. risoe. dk/rispubl/reports/ris-r-1400_ed2. pdf.

[29] MICHALKE G. Variable speed wind turbines: modelling, control, and impact on power systems [D]. Darmstadt, Germany: Technical University of Darmstadt, 2008.

[30] MICHALKE G, HANSEN A D. Modelling and control of variable speed wind turbines for power system studies [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www3. interscience. wiley. com/cgi-bin/fulltext/122437855/PDFSTART.

[31] LI S H, HASKEW T A. Characteristic study of vector-controlled direct driven permanent magnet synchronous generator in wind power generation// Proceedings of IEEE

Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 9p.

[32] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.

[33] YIN M, LI G Y, ZHOU M, et al. Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration// Proceedings of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 6p.

[34] RAMTHARAN G, JENKINS N, ANAYA-LARA O. Modelling and control of synchronous generators for wide-range variable-speed wind turbines. Wind Energy, 2007, 10(3): 231-246.

[35] 姚骏,廖勇,庄凯. 永磁直驱风电机组的双 PWM 变换器协调控制策略. 电力系统自动化,2008,32(20):88-92.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. Coordinated control strategy of back-to-back PWM converter for permanent magnet direct-driven wind turbine. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 88-92.

[36] 胡书举,赵栋利,李建林,等. 基于永磁同步发电机的直驱风电双脉宽调制变流器的研制. 动力工程,2009,29(2):195-200.
HU Shuju, ZHAO Dongli, LI Jianlin, et al. Development on dual-PWM converter for direct-driven wind power system based on PMSG. Journal of Power Engineering, 2009, 29(2): 195-200.

[37] AKHMATOV V, NIELSEN A H, PEDERSEN J K, et al. Variable-speed wind turbines with multipole synchronous permanent magnet generators: Part I modelling in dynamic simulation tools. Wind Engineering, 2003, 27(6): 531-548.

[38] CONROY J F, WATSON R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 182-189.

[39] SVECHKARENKO D. Simulations and control of direct driven permanent magnet synchronous generator [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/18.pdf.

[40] HANSEN A D, MICHALKE G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 333-348.

[41] HANSEN A D, MICHALKE G. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines. Renewable Energy, 2007, 32(9): 1594-1610.

[42] 胡家兵,贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制. 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. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 49-52.

[43] CHEN Zhe, GUERRERO J M, BLAABJERG F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(8): 1859-1875.

[44] SLOOTWEG J G, De HAAN S W H, POLINDER H. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 144-151.

[45] 胡书举,李建林,许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真. 高电压技术,2008,34(5):949-954.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Modeling on converters of direct-driven wind power system and its performance during voltage sags. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 949-954.

[46] 李建林,胡书举,孔德国,等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究. 电力系统自动化,2008,32(19):92-95.
LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.

[47] CONROY J F, WATSON R. Aggregate modelling of wind farms containing full-converter wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines: transient stability studies. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 39-52.

[48] 姚骏,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略. 电力系统自动化,2009,33(12):91-95.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-95.

[49] ABBEY C, JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.

[50] ULLAH N R, THIRINGER T, KARLSSON D. Voltage and transient stability support by wind farms complying with the E. ON Netz grid code. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1647-1656.

[51] 王锡凡. 分频风电系统. 现代电力,2007,24(2): 1.
WANG Xifan. Fractional frequency wind power system. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 1.

[52] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等. 风力发电引起的电压波动和闪变. 电网技术,2003,27(12):62-66.
SUN Tao, WANG Weisheng, DAI Huizhu, et al. Voltage fluctuation and flick caused by wind power generation. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66.

[53] USHIWATA K, SHISHIDO S, TAKAHASHI R, et al. Smoothing control of wind generator output fluctuation by using electric double layer capacitor// Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2007, October 8-11, 2007, Seoul, Korea: 308-313.

[54] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制. 电力系统自动化,2009,33(9):86-90.
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.

[55] MUYEEN S M, SHISHIDO S, ALI M H. Application of energy capacitor system to wind power generation. Wind

Energy, 2008, 11(4): 335-350.

[56] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Integration of an energy capacitor system with a variable-speed wind generator. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 740-749.

[57] BAROTE L, WEISSBACH R, TEODORESCU R, et al. Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage// Proceedings of 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 22-24, 2008, Brasov, Romania: 407-412.

[58] KAYIKÇI M, MILANOVIC J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.

[59] LALOR G, MULLANE A, O'MALLEY M. Frequency control and wind turbine technologies. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1905-1913.

[60] CONROY J F, WATSON R. Frequency response capability of full converter wind turbine generators in comparison to conventional generation. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(2): 649-656.

[61] COSTA A, CRESPO A, NAVARRO J, et al. A review on the young history of the wind power short-term prediction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(6): 1725-1744.

[62] 范高锋,王伟胜,刘纯,等.基于人工神经网络的风电功率预测.中国电机工程学报,2008,28(34):118-123.
FAN Gaofeng, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Wind power prediction based on artificial neural network. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123.

[63] POTTER C W, NEGNEVITSKY M. Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 965-972.

[64] 王锡凡,王秀丽.分频输电系统的可行性研究.电力系统自动化,1995,19(4):5-13.
WANG Xifan, WANG Xiuli. Feasibility study of fractional frequency transmission system. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(4): 5-13.

[65] WANG Xifan, CAO Chengjun, ZHOU Zhichao. Experiment on fractional frequency transmission system. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 372-377.

[66] 迟方德,王锡凡,王秀丽.风电经分频输电装置接入系统研究.电力系统自动化,2008,32(4):59-63.
CHI Fangde, WANG Xifan, WANG Xiuli. A new wind power grid connection method based on fractional frequency transmission system. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 59-63.

[67] AWEA. Green power superhighways: building a path to America's clean energy future [EB/OL]. [2009-08-29]. http://www.awea.org/GreenPowerSuperhighways.pdf.

[68] 王传杰.分频风电系统的频率控制策略研究[D].西安:西安交通大学,2009.

[69] 朱卫平,王秀丽,王锡凡.变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式.电力系统自动化,2009,33(11):94-98.
ZHU Weiping, WANG Xiuli, WANG Xifan. Optimal wind power capturing operational mode of a variable-speed variable-frequency wind power generation system. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 94-98.

宋卓彦(1980—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统及其新型输电的分析和控制。E-mail: songzh_y@126.com

王锡凡(1936—),男,中国科学院院士,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统分析、规划及电力市场。

滕予非(1984—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统及其新型输电的分析与控制。

Overview of Control Technologies for Variable-speed Constant-frequency Wind Turbines

SONG Zhuoyan, WANG Xifan, TENG Yufei, NING Lianhui, ZHANG Qin

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

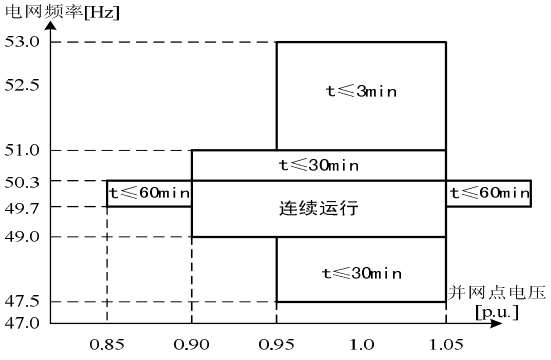
Abstract: This paper analyses and compares domestic and international grid codes, which define the requirements on the wind turbine control and objectives. The focuses are on the topologies of asynchronous doubly-fed induction generator (DFIG) and multi-pole permanent magnet direct-drive synchronous generator (PMSG), as well as their control schemes aimed at MPPT. A summary and comparison of control schemes is made. The control schemes in the LVRT situation of VSCF wind turbines and the protective measures are illuminated. The paper also stresses the PMSG control scheme and the protective measures. In the end of this paper, a brief description of the present research situation on wind turbines to improve power quality, frequency regulation capability as control objective is given, and fractional frequency wind power system with fractional frequency transmission technology is discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777052).

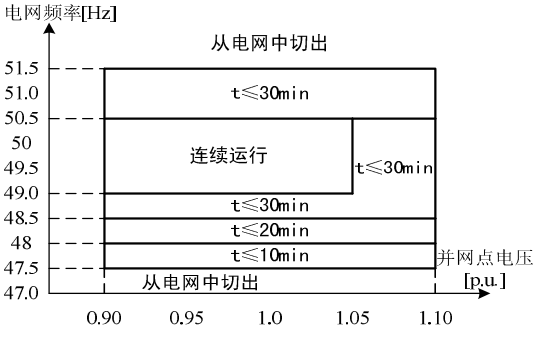
Key words: wind power generation; grid code; vector control; maximum power point tracking (MPPT); low voltage ride through (LVRT); fractional frequency transmission technology

附录 A

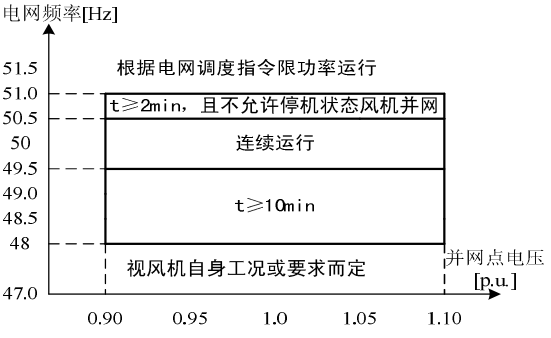
为了方便比较，图 A1(b)所示为 E.ON 公司对接入系统的风力发电机组最基本的要求，且电压的标幺值是对文献[9]中数据的近似；图 A1(c)是将文献[12]中的文字表述转换成图表的形式；t 表示风电场的运行时间。



(a) 北欧输电网技术规范



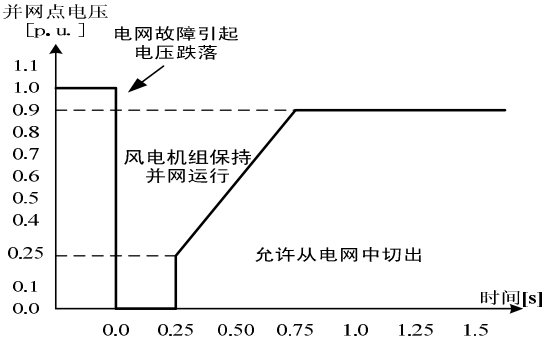
(b) 德国 **E.ON** 公司输电网技术规范



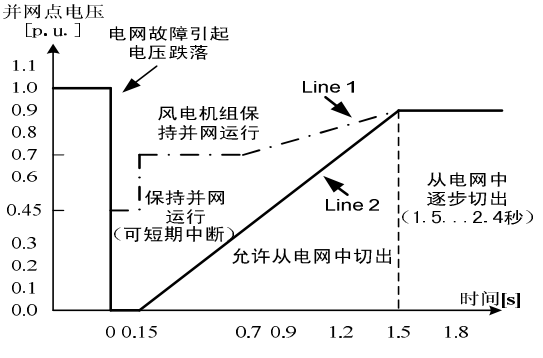
(c) 我国风电接入电网技术规定（修订稿）

图 A1 风电（场）机组的电压、频率运行区域[8-9,12]

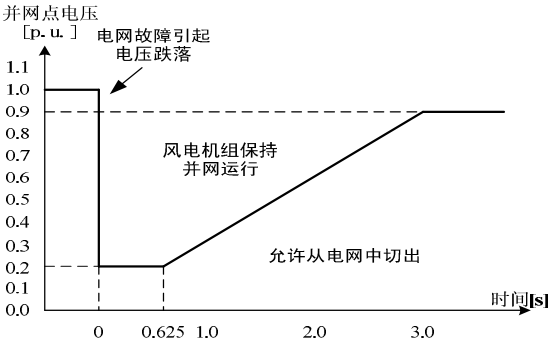
Fig.A1 Wind farm/turbines performance requirements in relation to voltage and frequency



(a) 北欧输电网技术规范



(b) 德国 **E.ON** 公司输电网技术规范



(c) 我国风电接入电网技术规定（修订稿）

图 A2 风电（场）机组的低电压穿越要求[8-9, 12]（三相对称短路故障）
Fig.A2 Voltage profile for LVRT of wind farm/turbines(a symmetric three-phase short circuit)

附录 B

表中定子电流 d、q 轴分量分别用 i_{sd}、i_{sq} 表示，机侧变流器和网侧变流器分别用 MSC 和 GSC 表示。

表 B1 最大功率点跟踪目标下的常用控制方案比较
Table B1 Comparison of general control schemes of MPPT

序号	控制方案	矢量控制（MSC）	控制器任务（MSC）	矢量控制（GSC）	控制器任务（GSC）	优缺点
1	单位功率因数控制	转子磁链定向（RRF）	通过控制 i_{sd}，保持总的无功功率为零，通过控制 i_{sq} 实现 MPPT。	网侧电压定向（GVRF）	控制 GSC 的 d、q 轴电流保持直流链电压 U_{DC} 为常数、无功功率为零。	只发出有功功率，变流器的容量可以做到最小；但由于不控制定子电压，转速过快时，变流器有过电压的危险。
2	最小损耗控制	同上	根据最小电机损耗函数，得到 i_{sd} 的参考值，通过控制 i_{sq} 实现 MPPT。	同上	同上	发电机的转换效率最优；但计算方法过于复杂，目前应用较少。
3	最大转矩控制	同上	全部的定子电流 i_s 用来产生转矩，即保持 i_{sd}=0，控制 i_{sq} 最大限度地捕获风能。	同上	同上	发电机利用程度高，其尺寸可以做得更小；但无功功率不为零，变流器必须采用全控型器件。
4	常定子电压控制	定子电压定向（SVRF）	通过对 i_{sd} 的控制实现 MPPT；控制 i_{sq} 保持定子电压 U_s 为给定值。	同上	同上	不必担心过电压问题，U_s/U_{DC} 可以保持恒定；缺点是无功功率不为零，变流器须采用全控型器件。
5	GSC 控制有功、无功功率	同上	分别控制 i_{sd}、i_{sq} 保持直流链电压 U_{DC}、定子电压 U_s 为常数。	同上	控制 GSC 的电流 d 轴分量实现 MPPT，q 轴分量保持无功功率为零。	同上