变速恒频风力发电控制及其保护系统的发展

首先，介绍了国内外风力发电机组装机总量的发展现状，接着对风力发电机组的生产设计要求以及各国风电并网运行时的具体技术规范逐一做了讨论，并得出风力发电机组正常运行时的主要控制目标。然后，针对双馈感应异步发电机和直驱永磁同步发电机这两类变速恒频风力发电机，在分别以最大功率点跟踪和低电压穿越为控制目标情况下的控制方案及保护措施进行分析、讨论。最后，对这两种控制目标发展的主要方向做出总结。

李 静 王 龙 赵 瑞 孙灵芳/东北电力大学自动化工程学院

李 静/副教授

关键词/Keywords
双馈感应异步发电机·
直驱永磁同步发电机·
最大功率点跟踪·
低电压穿越·

近年来，全球的风电装机容量保持了高速增长。根据世界风能协会的最新报告，仅2012年新增装机容量就达到44 GW，增长率19.2%，总量282 GW。其中，欧洲、北美和亚洲是三大主要市场：欧洲占装机总量的27.5%；北美洲占装机总量的31.3%；亚洲占装机总量的36.3%。根据欧洲风能协会的报告显示，风能促进欧盟2007～2010年四年间的累积增长总值达33%，2011年欧洲的风电装机总量达到90 616 MW，预计供电总量占欧洲电能供应总量的6.3%。截至2012年底，欧洲风电总装机容量达到106 040 MW，同比2011年增长约12%。而按欧洲风能协会最新的规划，到2020年风电要满足欧洲地区20%的电力供应。美国近年来风电装机总量增长也很迅速，根据美国风能协会2013年报告显示，全美风电装机总量达60 GW。中国发展风电起步晚，但截至2012年底，风电装机总量已达75.3 GW，相比于2011年的62.3 GW，增长20.8%，位居世界第一。

本文通过分析对比部分欧洲国家、北美以及中国的电网技术标准，首先明确风电运行主要的控制目标，并针对目前应用较广泛的双馈感应异步发电机（Double Fed Induction Generator，DFIG）和直驱永磁同步发电机（Permanent Magnet Synchronous Generator，PMSG），重点展开的最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）和低电压穿越（Low Voltage Ride Through，LVRT）两方面研究进行了归纳。

风力发电机组技术规范及相应控制目标

风力发电机组在生产设计和并网发电时都需要遵循一定的设计标准，这些标准共同保证了风力发电机的运行可靠性。本文将逐步讨论风力发电机组在生产设计时以及并网发电时的标准，进而得出风力发电机组在稳定运行时的控制目标。

1. 风力发电机组设计标准

TC88分委会主要职责是协调出版风能设计认证标准等。其中，IEC风力发电机组测试认证体系标准在总结风电发展阶段性成果基础上，规范了风力发电机组在生产检测、技术规则、认证程序、报告形式和证书颁发等方面的一系列问题。而IEC 61400系列标准与风力发电机组的认证标准关系密切，与其他IEC系列标准之间也需要相互参考，如风力发电机组设计时的发电机部分需要参考IEC 60034标准、电气设备安全性需要参考IEC 60204－1标准等。

其实，我国现行的电能质量评估标

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

准（GB/T 20320），在本质上和并网电能质量测试标准（IEC 61400－21）是相同的。

2. 风力发电机组并网标准

风力发电技术的长足发展，导致大规模风电场扩建，其产生的电能正迫切需要大容量、高电压的输电网络进行传送，统一、可靠的电网运行标准就显得尤其重要。然而，由于电力网络本身配置的复杂性，时变风速对并网运行稳定性影响，电网调度随用电负荷的不断变化，以及电力系统市场化运行等一系列问题导致难以形成统一、有效的电网运行标准。因此，各国根据自身实际情况制定了相应的电网运行技术规范。

欧洲国家和地区的风力发电应用普及率较高，其中德国又以31 308 MW的装机总量位居欧洲第一位。德国的E.ON公司在2006年制定的输配电网络技术规范将电网电压等级分为110 kV、220 kV和380 kV三个等级，而离岸型海上风力发电机组的电压等级为155 kV。英国的电压等级主要分为132 kV（苏格兰为32 kV）、275 kV和400 kV。北欧的瑞典、丹麦、荷兰及挪威四国为了整合北欧电力市场，提高电网的运行可靠性和电能质量，各电力系统供应商于2007年自发形成了北欧四国的输配电网络技术规范，对110～420 kV范围内的风力发电机组并网运行规范制定了具体要求。北美地区各州（省）电网标准不一，电力市场构成复杂，难以形成统一有效的电网技术标准。北美的大部分地区逐步采用美国电气和电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronic Engineers，IEEE）公布的标准IEEE Std 1366TM—2003；IEEE又于近期发布了IEEE 1547.4，帮助运营商及设计规划人员进行离、并网电力系统的标准统一。美国能源监管委员会于2005年6月颁布，规定适用于风电场的额定容量为20 MW。目前，我国执行的标准主要是由中国电力科学研究院起草的GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》，主要规定了风电场新、扩建时电力系统110 kV及以上输电线路的具体要求；电压波动和闪变、三相电压不平衡度、电力系统频率偏差、公用电网谐波和供电电压偏差等是目前常用的一系列相关电能质量标准。制定了电网运新标准的其他国家还有比利时、加拿大（魁北克）和新西兰等。

目前，由于各国风力发机技术的进展不同，以及风力发电机组装机总量在整个系统中所占比重的不同，导致风电并网运行的具体技术规范相关文献资料较少。近几年风电并网技术的标准在无功功率补偿、调压调频和继电保护等方面一直难以形成具体有效的规范标准。

德国的E.ON公司规定风力发电机组的工作频率为47.5～51.5 Hz，电压为0.9～1.1（pu）；北欧的风力发电机组并网运行时要求频率为47.5～53.0 Hz，电压为0.85～1.10（pu）；根据2011年推出的《风电场接入电力系统技术规定》，中国的风力发电机组并网运行时要求频率为48～50.2 Hz，电压为0.9～1.1（pu）。

当电网侧发生故障时，世界各国执行的标准不尽相同。在高电压等级中，北欧、丹麦、比利时、魁北克、新西兰、英国和德国的电网导则对电压跌落有具体规定，即使跌落为0%，也必须保持并网运行；在低电压等级中，电压跌落略高于15%。在有功功率的恢复过程中，德国规定恢复到90%及以上额定电压后，有功功率恢复到100%的时间要求是5 s；而英国要求恢复到80%及以上的额定电压后，有功功率恢复到90%的时间要求是0.5 s。在无功功率补偿的要求上，德国E.ON公司对电压跌落期间无功功率的支持有相关要求。

通过上述对比分析可见，虽然我国的风电装机总量位居世界第一，但国内的《风电场接入电力系统技术规定》相比于发达国家在很多指标上有待改进。实际上，由于我国的风能在能源供应比例中所占份额较低，导致相应的技术发展滞后，电网对风力发电机组的实时频率调节能力不强。随着风力发电技术的不断成熟，我国的风电并网标准也将逐步趋于严格、标准。

3. 风力发电机组控制目标

通过对IEC以及各国现行标准的分析，对风力发电机组的控制要求主要包括：①提高风力发电机组的风能利用率，实现MTTP；②在风力发电机组电压过低时保持低压运行2 s左右，并与电网保

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

持连接状态，通过提供无功功率进行功率补偿以尽快恢复正常运行状态，即LVRT；③满足国际电工委员会标准以及国标对于风力发电机组输出电能质量的具体要求；④在一定范围内实现调频调压，以保证电网的中长期运行可靠性，即根据风力发电机组的具体情况实现风力发电机组有功、无功功率的控制。

下面将主要针对前两个控制目标的相关控制技术方案进行详细说明。

MPPT时的变流器控制方案

从文献[1]可见为保证风力发电机组在不同风速下的正常运转，其控制策略主要有：①功率优化。为了实现最大限度地捕获风能，在风速低于风力发电机组额定转速的情况下，通过齿轮机组调节转速，使风力机在最佳状态下稳定运行。②限制功率为额定值。在风速高于风力机组的额定值时，通过调节叶桨距保持转速稳定运行在额定转速。③限制功率为给定值。在某些特殊情况下，需要根据网侧电力系统的具体调度要求实时地控制有功、无功功率，或者具备一定的调压调频功能。本小节仅对VSCF风力发电机组实现MPPT进行控制方案上的讨论，目前针对DFIG的研究已具备相对完善的应用技术，在这里将主要阐述PMSG实现MPPT时的相关控制方案。

此外，对VSCF风力发电机的控制包括：控制桨距角和控制变流器。对桨距角的控制，是针对风速的不同情况，通过控制桨距角调节风能的捕获。然而，针对垂直轴的研究也成为热点，但还只是对变流器进行控制[2]。目前针对桨距角研究较多的是模糊控制，有针对独立变桨距进行的研究；但更多的是结合功率控制、电网故障等具体问题进行的协调控制，在协调控制过程中往往需要将变桨距控制与变流器控制相结合。

1. DFIG变流器

DFIG变流器的优势在于经济性高，主要因为相对于全功率变流器其容量相对较小。DFIG的变流器拓扑结构根据机侧和网侧的控制器件不同可以分为：①机侧采用二极管不可控整流，网侧采用晶闸管可控逆变。该拓扑结构简单，可靠性高，机侧的不可控整流会产生谐波。②背靠背脉宽调制。采用全控器件，有效控制谐波含量，矢量控制技术可以实现有功、无功功率解耦，电流、电压双环控制，是目前应用较为普遍的拓扑形式。目前，DFIG的变流器主要采用back－to－back拓扑，且使用矢量控制方案：机侧变流器通过对定子磁链矢量控制，实现风能最大捕获；为保持直流电压为常数，网侧变流器通常采用的技术控制方案为电压矢量控制。

在DFIG变流器控制方案的选择上，根据控制对象的不同可以分为以下四种。

1）叶尖速比（TSR）。该方法主要是通过实时跟踪最佳叶尖速比调整风叶转矩来达到最大风能捕获，在叶尖速比控制目标的基础上取得了较丰硕的成果。比如，通过抑制转矩波动造成的能量损失实现能量的最大捕获[3]等。

2）最优转矩（OT）。在传统方案的PI控制、鲁棒控制等追踪最佳转矩方案的基础上，有一些学者采用滑模控制、多输入多输出控制等策略在不同情况下也较好地实现了最优转矩控制目标。

3）信号反馈（PSF）。需要对最大风能捕获情况下的数据进行历史数据形成列表，将反馈信号巡查历史数据列表实现最大风能捕获[4]。

4）爬坡法（P&O）。爬坡法能够不间断地跟踪最大功率点，比如通过主副两套模糊逻辑控制实现的爬山搜索方案[5]很好地实现了控制目标。

2. PMSG变流器

（1）PMSG变流器拓扑

PMSG变流器的拓扑结构根据变流器的不同有多种组合方案，不同拓扑结构的控制方案也有较大不同。下面对PMSG常用拓扑结构进行简要说明。

1）机侧变流器（MSC）采用二极管不可控整流，网侧变流器（GSC）采用IGBT或GTO可控整流。这种拓扑结构控制简单、可靠性高，但是机侧的不可控整流导致的谐波会影响发电机的使用寿命，风能利用率不高；网侧使用可控器件可以有效控制谐波含量，保证输出的电能质量。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2）MSC和GSC全部采用IGBT或GTO，即背靠背结构。在机侧和网侧同时采用可控器件能提高发电机利用效率、减少谐波含量，输出电能质量高；但是全控器件价格较高，控制算法复杂，需要额外增加多项保护措施。

3）多电平背靠背。将机侧和网侧同时采用的三电平可控变流器变为多电平变流器，能够提高变流器总功率，降低单个可控器件承受的压降，提高使用寿命；由于可控器件的大量采用，导致成本高昂，系统庞大，控制较复杂。

此外，随着风电场的大规模扩建以及要求越来越严格的输出电能质量，很多学者在模块化、多电平研究的基础上不断提出新的控制策略[6]。

（2）PMSG的控制方案

PMSG的变流器常用的控制策略与DFIG大体一致，也包括前述的TSR等四大类。具体实现方案上也各不相同，如在传统PI控制、鲁棒控制的基础上进行的改进，结合多种智能控制算法的混合方案等。

目前，PMSG的拓扑结构多使用背靠背结构，矢量控制方案。在机侧采用转子磁链的矢量控制方案，关键在于转子磁通的矢量控制，而系统的控制是基于滑动模型观测器，主要与电流$d-q$轴分量有关，借以实现对电磁转矩的控制，从而实现MPPT[7]。

以LVRT为目标时的控制和保护

根据上文所述，当电网发生故障时，为使电网尽快恢复正常，VSCF要求风力发电机组在保证自身正常运行的前提下，能够向电网提供无功功率。本文将分别介绍DFIG和PMSG相应保护策略的研究进展。

（1）LVRT时DFIG的控制方案和保护措施

当DFIG并网运行时，电网侧电压跌落后会导致严重的对称或不对称故障。由于定子磁链难以跟随定子电压瞬间降落，定子磁链瞬间保持不变，而转子磁链随定子电压的跌落将产生转子的过电流和直流母线的过电压。过电流和过电压容易烧毁变流器，为了保证风力发电机组运行的安全性，必须做出保护措施。根据保护措施的对象不同，往往采取不同的保护策略。

1）引入crowbar。由于发生故障时，风力发电机组输出的能量不变，而电网接收能量降低，导致多余的能量会集聚在系统内部的变流器、直流母线等处，通过主动或被动式地引入crowbar电路可以消耗多余的能量。文献[8]给出了一种crowbar电路的改进方案，将转子电流和直流母线电压作为反馈信号，对crowbar电路的阻值大小进行实时的优化选择以增强泄流能力防止电流过高。然而，由于利用crowbar保护电路对转子电流最大值有要求[9]，故当处于故障第二阶段时需要对crowbar保护电路进一步改进。

2）利用变流器。文献[10]提出不使用crowbar电路的保护策略，可以利用多种方法实现网侧-机侧功率、电压等变量的平衡防止电压过高等问题，文献[11]提出了一种改进的变流器应用方案，将网侧和机侧的变流器并联，可以将无功功率的补偿能力提高一倍。

3）引入储能介质。如果将直流母线与铅蓄电池等储能介质并联，可以在正常或者非正常运行状态下更好地控制直流母线电压，实现过电压保护。

4）优化控制策略。利用先进算法实现对风力发电机组的最优控制研究也较为广泛，如遗传算法、粒子群算法和细菌觅食算法等都见诸于文献。

5）引入补偿器。利用外部设备提高LVRT能力也有很多相关的技术研究，主要分为并联补偿和串联补偿。并联补偿主要是用于提供无功功率，维持电压水平；串联补偿容性电压，改善电压质量，增强电力输送能力。目前，针对并联补偿的研究，一类是静止无功补偿（SVC），另一类是静止同步补偿（STATCOM）；针对串联补偿的研究主要是动态电压恢复器（DVR）。未来，结合补偿器对风电场并网节点处的保护将是热点之一[12]。

（2）LVRT时PMSG的控制方案和保护措施

PMSG采用较多的是全控背靠背变流器，相对

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于DFIG的变流器容量较大，能提供无功功率支持网侧电压有助于恢复正常工作状态，而且全控变流器能将风力发电机组和电网隔离开来，在发生故障时能起到缓冲作用。故PMSG比DFIG有更好的LVTR能力。然而，当电网电压跌落时，PMSG与DFIG同样都会产生直流母线过电压问题，不对称故障的负序分量则会导致输出的有功功率波动，进而直流母线电压也会随之产生波动。本文主要介绍LVRT时PMSG的几种方案。

1）桨距角控制。在发生电压跌落时，通过控制桨距角实现PMSG能量获取的调节，然而在严重故障时往往是将桨距角控制与继电保护结合以达到更好的保护目的。在基于转速的控制方案上，转速和直流母线电压本来是非线性关系，文献[13]则给出了一种线性反馈控制策略，仿真证明了方案可行性。

2）引入crowbar。当多余能量储存于直流母线导致过电压时，往往主动接通撬棒进行泄流，使机侧和网侧的能量平衡，降低直流母线电压，其原理与DFIG本质上是一样的，不再赘述。在实际应用中，往往是将桨距角控制和撬棒泄流协调使用。

3）变流器控制。变流器的控制包括机侧变流器控制和网侧变流器控制，机侧变流器可以检测有功功率输出、稳定直流母线电压和减小不平衡功率等；网侧变流器则根据网侧电压情况，能够实时调整有功、无功功率。变流器控制的本质是实现功率的平衡，网侧变流器和机侧变流器既可以分别单独作用，也可以协同作用或者是用两套PWM分别对有功、无功功率实现单独控制[14]。

4）引入储能系统。与DFIG一样，直流母线出现过电压情况时也往往使用各种储能系统以增强供电可靠性。目前，电池储能的研究相对较成熟，如铅酸介质、钠硫介质和全钒液流介质等各类型电池。此外，还有用超级电容等各类储能介质，以及将多余的能量转化为风叶的动能储存等，其本质和DFIG相一致，技术上可以相互借鉴。在储能技术的研究上也在不断取得进展，相比于传统的单变流器实现能量储存，文献[15]提出协调控制机侧和网侧变流器共同实现能量储存；文献[16]提出了一种针对松弛调峰瓶颈状态下大容量储能系统的优化方法。

5）引入补偿器。针对PMSG进行的各类补偿器研究，也主要包括并联补偿和串联补偿两方面。此外，还有协调运用并联、串联补偿的统一潮流控制器（UPFC）。

结束语

本文在分析对比了国内外风力发电机组并网运行标准后，对VSCF风力发电机组实现两项主要控制目标——MPPT和LVRT的常用控制方案进行了综合叙述，在提出未来可能的研究热点后给出了相应的理论依据。

在今后的研究中，需要注意以下问题。

1）通过对比国外的电网导则可以发现，国外不少发达国家已经能够实现风能并网运行标准和火电运行标准相一致，虽然中国的风电装机总量位居世界第一，但在实际并网发电应用技术标准上和国外发达国家还有一定差距。中国最新制定的风电并网技术规范在电网故障时的功率支持、调频能力等方面的技术指标都没有国外的具体，实际操作的标准化程度有待提高。

2）在未来变速恒频风力发电机的MPPT控制方案研究中，根据目前研究较多的多电平串并联大容量系统思想，在系统结构上进行模块化的串并联优化会是未来方向之一。相比于传统PI控制、自适应控制等，采用非线性、模糊逻辑控制等多套智能控制方案的变流器转化率往往较高，振动耗能更小，这两点是提高MPPT的主要研究目标。

3）在变速恒频风机处于LVRT状态时，往往是引入外部储泄能、补偿器件或利用变流器的结构变换辅以控制方案的优化进行控制保护等，如果在网侧、机侧两套模块化串并联变流器综合利用的基础上，采用多套优化控制策略并辅以外部传统补偿器件，将会在能量的平衡和功率的支撑两方面同时取得很好效果，会是较热门的研究方向。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] Qizhong L，Lan Y，Guoxiang W．Comparison of control strategy for double-fed induction generator （DFIG） [J]．Measuring Technology and Mechatronics Automation （ICMTMA），2011 (1)：741-744．

[2] Muhammad M A B，Nasir H，Ahmed U F，et al．Vertical axis windturbine-A review of various configurations and design techniques [J]．Renewable and Sustainable Energy Reviews，2012，16 (4)：1926-1939．

[3] Muhando E B，Senjyu T，Uchida K．Stochastic inequality constrained closed-loop model-based predictive control of MW-class wind generating system in the electric power supply [J]．IET Renewable Power Generation，2010，4 (1)：23-35．

[4] Barakati S M，Kazerani M，Aplevich J D．Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter [J]．IEEE Transactions Energy Convers，2009，24 (1)：705-713．

[5] Azzouz M，Elshafei A，Emara H．Evaluation of fuzzy-based maximum powertracking in wind energy conversion systems [J]．IET Renew Power Generation，2011，5 (6)：422-430．

[6] 王国强，王志新，李爽．模块化多电平变流器的直接功率控制仿真研究 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (6)：64-71．

[7] Merzoug M S，Benall H，Louze L．Sliding Mode Control （SMC） of Permanent Magnet Synchronous Generators （PMSG） [J]．Energy Procedia，2012，18：43-52．

[8] Maoze W，Wei X，Hongjie J，et al．A novel method to optimize the active crowbar resistance for low voltage ride through operation of doubly-fed induction generator based on wind energy [C]．Hangzhou：Industrial Electronics （ISIE），2012．

[9] Da Costa J P，Pinheiro H，Degner T，et al．Robust controller for DFIG of grid connected wind turbines [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58 (9)：4023-4038．

[10] Long T，Shao S，Malliband P，et al．Crowbarless fault ride through of the brushless doubly fed induction generator in a wind turbine under symmetrical voltage dips [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2013，60 (7)：2833-2841．

[11] 邓文浪，陈智勇，段斌．提高双馈式风电系统故障穿越能力的控制策略 [J]．电机与控制学报，2010，14 (12)：15-21．

[12] 撖奥洋，张哲，尹项根，等．双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建 [J]．电工技术学报，2012，27 (4)：233-239．

[13] Kihong K，Yooncheul J，Dongchoon L．LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2012，27 (5)：2376-2384．

[14] Ziping W，Wenzhong G，Daye Y，et al．Comprehensive modeling and analysis of permanent magnet synchronous generator-wind turbine system with enhanced low voltage ride through capability [C]．Energy Conversion Congress and Exposition （ECCE），2012 IEEE，Raleigh，NC，2012．

[15] Alepuz S，Calle A，BusquetsMonge S，et al．Use of sored energy in PMSG rotor inertia for low-voltage ride-through in back-to-back NPC converter-based wind power systems [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，60 (5)：1787-1796．

[16] 严干贵，冯晓东，穆钢，等．用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法 [J]．电机工程学报，2012，32 (28)：27-35．

（收稿日期：2014－11－03）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net