

# 风力发电系统低电压穿越技术研究

刘卓恒

国电电力广西风电开发有限公司 广西壮族自治区南宁市 530000

**摘要：**风电场是当前最受关注的新能源，在其接入电网后，如果不能及时调整控制策略，不仅会引起风电场的飞车，还会引起直流侧电容电压的上升，对电力电子设备的运行安全构成了极大的威胁。本文研究了直驱永磁风力发电系统的运行机理和拓扑结构，阐述了风电并网所需满足的低电压穿越技术要求，并将模型预测控制算法应用于直驱永磁风力发电系统低电压穿越控制。

**关键词：**风力发电系统；低电压穿越；永磁同步发电机；模型预测控制；价值函数

在石油、天然气等传统化石能源逐渐耗尽的情况下，像风能、太阳能、核能等清洁能源已经逐渐发展成了目前世界上必不可少的新能源，而风能更是成为了最有潜力的一种能源。近年来，我国在甘肃，新疆，内蒙古，舟山群岛等多个省份成功建成了大规模的风电机组，为“西电东送”和“长三角”的发展提供了有力的支撑。但是，大规模的风电也对大型电网的安全运行提出了新的挑战。风能具有间歇性和不确定性的特点，如果在没有对其进行有效调控的情况下，风能将对由火电和水电组成的传统大电网造成严重影响。为了更好地发挥风能，提升风能的友好性与稳定性，国家颁布了一系列关于“低压穿越”的规定，并在实际应用中对其进行了试验验证，以增强该新能源系统的抗灾与抗灾能力。因此，开展低压穿越技术的研究对于我国风电行业的快速稳定发展具有十分重要的意义。

## 1. 风力发电系统原理

风力发电系统包括了风力机、发电机、传动链、控制装置等，它的功能是把洁净的风能转化为电能，然后利用风电并网，把电能传送到千家万户。风电控制器是解决风电运行中极端不确定因素的重要手段，是实现变非可控能为可控能的重要手段。

风力机是人们对风电系统的认识和理解的结果，一般包括三个叶片的风轮和塔架等。按安装位置可分为两类：一类是水平式，另一类是垂直式；风力发电机按其控制方式可分为三类：定距失速，变距失速，主动失速。

发电机是将风力机产生的机械能与电能联系起来的桥梁，风电并网的条件十分苛刻，不仅要保证并网点电压幅

值一致，还必须做到并网频率一致。风电机组可分为两种，一种是定速运转，另一种是可变转速运转。该变流器由二极管、IGBT等功率电子元件构成，利用先进的高性能控制算法，可将任意频率、任意幅度的风电接入到大电网中。在风力发电发展的初期，在各风电场中，使用较多的是笼式异步风力发电机和双馈异步风力发电机。后来，PMSG因为功率因素高、定子电阻损耗小等优势，逐渐得到了工业上的认可并普及。到目前为止，已经有许多学者提出了一种新的基于PMSM的变速、恒频风力发电机。

## 2. 低电压穿越技术要求

低电压 RT 技术与风力发电的装机容量和未来的发展密切相关，因此，世界上许多国家都制订了相应的低电压 RT 标准。但是，这些问题可以归结为：在出现不同程度的电压跌落时，对风力发电系统维持稳定的时间，对无功的动态调整，以及故障消除后的有功的恢复率。2012 年，国家修订并发布了《风力发电低压穿越技术规范》。

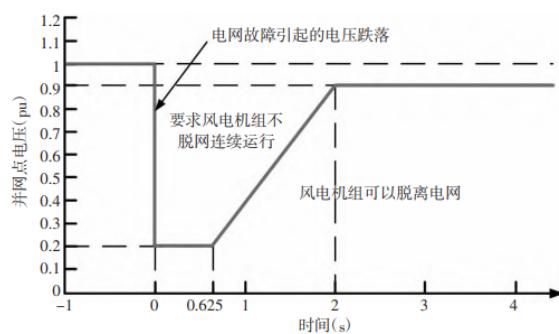


图 1 风电 LVRT 技术标准

该标准规定：（1）当电力系统的电压降到额定电压的

20% 以下时，风电机组可以继续接入电力系统 625 毫秒；(2)当电网电压下降时，必须在 2 秒内将其恢复到额定电压的 90% 以上，在这段时间里，风电场必须维持并联操作，使其能够迅速地恢复到网络电压；(3)电力网在断开故障后，必须迅速恢复，且恢复速度不低于每秒钟 10% 的额定电力。

### 3. 主要的电网问题

#### 3.1 电压工作范围

为了确保风电机组在并网过程中能够适应电网电压的变化范围，通常要求机组具备一定的电压调节能力，包括在额定电压上下若干百分比内仍能正常运转。具体而言，很多电力系统规定风电机组必须在额定电压  $\pm 10\%$  或更大范围内保持稳定运行，以保证电能质量和供电可靠性。风电机组需要配合使用各种电力电子变流技术或无功补偿装置，如静止无功补偿器 (SVC) 或静止同步补偿器 (STATCOM)，以在电网电压偏差较大时提供电压支撑和调节。与此同时，机组控制系统应实时监测电网电压水平，并根据电力调度部门的要求进行响应，包括在超出安全界限时及时停机或降额运行，从而保护发电设施并维护电力系统安全。合理设计和配置风电场的电气设备，不仅能减少风电并网对电网电压产生的冲击，也能为后续的电力系统调度和电压控制提供更广阔的灵活性和可靠性保障。

#### 3.2 频率工作范围

在电力系统中，频率的稳定性至关重要，风电机组必须能够在规定的频率工作范围内正常运行。通常来讲，大多数电网的额定频率为 50 Hz，但在实际运行过程中可能会出现短时的频率偏差。按照国际或地区标准，风电机组应能够在 47.5 Hz 至 51.5 Hz 范围内持续运行，并且具备应对每秒 0.5 Hz 甚至更高阶跃变化的能力。为满足这些要求，风电机组需要配置快速响应的控制系统，能够通过调整叶片角度或有功功率输出适时调节发电量，从而减小频率波动所带来的影响。通过这种方式，风电机组不仅可以在系统出现频率偏差时快速反应并保持自身安全运行，也能在一定程度上协助电力系统进行频率调节。与其他电源相互配合，共同维持电力系统在各类运行工况下的稳定和可靠。

#### 3.3 有功功率控制

有功功率控制是风电机组并网运行的关键一环，其核心目标是让风电机组能够在不同风况下，根据系统调度或运行策略要求灵活调整输出功率，以实现与电网频率和负载的

协调。具体而言，通过改变风轮的叶片角度（桨距控制）或调整发电机的电磁转矩，风电机组可以在风速变化时使输出功率更平稳或更符合电网调度需求。当电网出现负荷骤增或频率下降等情况时，机组可按照预先设定的功率 – 频率曲线提高输出功率，以辅助系统缓解频率下降；同样，在负荷降低或风力过强时，机组也能降低输出功率或进行空载运行，以避免对电网造成冲击。通过有功功率控制，风电机组在保证自身安全运行的同时，也为电网的频率稳定和功率平衡贡献了重要力量。

#### 3.4 频率控制

在现代电网中，频率控制是维持系统稳定的核心环节之一。过去，风电场多被视为难以调节的随机电源，但随着电力电子和控制技术的发展，越来越多的风电机组具备一定的频率调节功能。在实际运行中，当电网频率偏离额定值时，风电机组可通过快速响应机制改变自身有功功率输出，从而辅助电网进行一次或二次调频。尤其是在高比例可再生能源并网的背景下，“虚拟惯性”或“合成惯性”技术得到了广泛的研究和应用，通过在短时间内提供或吸收能量，减少电网频率的波动幅度。若系统频率持续偏离安全范围，风电机组还可在调度中心的指令下进行进一步功率调整或有序脱网，避免大范围故障的发生。通过提升风电机组的频率控制能力，电网对波动性可再生能源的消纳能力将显著增强，为绿色低碳能源转型奠定更坚实的技术基础。

#### 3.5 电压无功控制

电压无功控制对于维持电网电压水平和提升电能质量具有重要意义。风电机组在并网过程中，需要根据电网调度要求对无功功率进行调节，以保持终端电压稳定。若风电场无法提供足够的无功支持，当系统负荷波动或故障发生时，电压可能出现过高或过低的情况，进一步威胁设备安全。为避免此类问题，风电机组通常配置可调节的无功补偿装置，如静止无功补偿器 (SVC) 或静止同步补偿器 (STATCOM)，并配合先进的控制算法，实现对功率因数与电压的精准调节。某些电力标准会要求风电机组在不同负荷状态下保持功率因数在一定范围内，例如在 0.95 感性到 0.95 容性之间。若机组无法满足此要求，可能导致并网许可受限或承担额外费用。

#### 4. 低电压穿越的发展

低电压穿越 (LVRT) 是指在风电系统中，在风电系统

中的电压降低的情况下，风电系统能够在一定程度上保持网架，并为网架提供一定的无功，以支撑网架的恢复，直到网架完全恢复，这样就能“穿越”低电压的时段（地区）。中国的 LVRT 标准为输出功率 20%，输出功率为 625 毫秒，与美国风力发电协会（AWEA）规定的 LVRT 值相近。对双馈式异步发电机及 PMSG 的低压穿越技术作了简单的阐述。

**双馈异步发电机的低电压穿越技术：**双馈异步发电机定子侧直接与电网连接，电网与电网直接耦合，使得电网电压降直接反映到定子端电压上，导致定子磁通直流分量的产生，在不对称故障时，会产生负序分量。在电机高速运转时，由于其直流、负序等因素，其定子磁通会产生较大滑移（即在转差频率附近的  $k\omega_s$ 、 $2k\omega_s$ ， $k\omega_s$  为同步角频率），转子电位增大，转子电流增大，转子回路电压、电流显著增大。

在双馈异步发电机中，交流 / 直流 / 交流变流器与转子端相连，转子端部存在一定的过压、过流能力。若不对其进行有效的抑制，过高的瞬态转子电流会对其脆弱的电力电子装置造成极大的危害。由于变流器的输入、输出不平衡会引起直流线路电压的升降，使得低压穿越的实现变得非常复杂。

以下是一些关于双馈异步发电机低压穿越的简单描述。在双馈式异步电动机的运行控制中，通常采用的都是定子电压或定子磁路的矢量控制器。该方法利用常规的 PI 调节器对系统进行有功、无功独立调节，同时对系统的扰动有较好的抑制作用。

## 5. 双馈感应发电机建模与控制

在风电机组中，电力电子变换装置通常仅需处理整个风机输出功率的 20%–30%，而不是全部功率。这意味着，与传统的全功率变换方案相比，DFIG 系统的功率转换器体积较小、成本较低，转换损耗相对较低，提高了整体系统的经济性。此外，由于变频器仅需调节部分功率，使得风力发电机可以在较宽的风速范围内高效运行，并能主动参与电网调节，提高风电场的电网适应性。

双馈感应发电机的基本结构由定子绕组、转子绕组、滑环系统和功率变换器组成。定子绕组直接连接到电网，承担主要的电能输出功能，而转子绕组通过滑环与变频器相连，借助功率电子装置对励磁电流进行调节，以实现有功和无功功率的独立控制。其工作原理是基于电磁感应和同步参考系的电气特性，通过变频器向转子绕组注入可控电流，从而控

制转速及输出功率。

在数学建模方面，为便于分析和控制，双馈感应发电机的电磁关系通常在同步参考系（dq 轴）下进行描述。假设定子和转子的电磁特性满足电磁感应定律，定子和转子电压方程可分别表示为：

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \quad (1)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r \quad (2)$$

其中：

$V_s, V_r$  分别为定子和转子电压；

$I_s, I_r$  分别为定子和转子电流；

$\psi_s, \psi_r$  分别为定子和转子磁链；

$R_s, R_r$  为定子和转子的电阻；

$\omega_s$  为同步角速度， $\omega_r$  为转子角速度。

基于上述数学模型，双馈感应发电机的控制系统通常采用矢量控制方法，通过解耦控制实现有功功率和无功功率的独立调节。具体而言，采用定子磁链定向方式，将定子磁链与 d 轴对齐，使得 q 轴上的电流分量控制有功功率，而 d 轴上的电流分量控制无功功率。变频器通过调节转子电流，确保风机在不同风速下的最佳运行状态，同时在电网电压波动时提供无功支撑，提高风电系统的稳定性。综上所述，双馈感应发电机的建模与控制涉及电磁特性分析、同步参考系变换及矢量控制策略的应用。由于其功率变换器仅需处理部分功率，使得 DFIG 方案在风电系统中具有较高的经济性和运行效率，能够在并网和孤岛模式下均保持稳定运行。未来，随着风电并网技术的发展，基于智能控制与优化算法的 DFIG 控制策略仍是研究的重点，以进一步提高风电系统的稳定性和适应性。

## 6. 发展趋势

大型风力发电机该技术能够有效地减小风电的占地面积，降低风电的并网费用，同时也能有效地提高风电的利用率。风力发电机变成了无电刷的。采用无刷卡方式，可以增加系统的可靠性，无需维护，从而增加了发电的效率。在强网地区，对低压穿越的需求可以适当的放松，这样可以减少工程造价。为了保证电力系统和电力系统的安全，需要对电力系统进行严格的低压穿越。

鉴于双馈异步风电系统的运行控制实质是对励磁频率的调控，针对不同类型的电网故障，如何优化双馈异步风电系统的控制策略，是未来低电压穿越领域的一个重要课题。

尤其是当电网发生轻微故障时，在不添加任何硬件的前提下，对系统进行了改进。

## 7. 结论

随着以双馈异步发电机为主的大型风电机组的安装规模越来越大，如何提升其接入风电的能力已成为亟待解决的问题。随着电网电压下降，对并网风电机组的需求越来越大，需要其具有较强的低电压穿越能力，因而如何提升其低电压穿越能力成为今后的研究热点。尽管双馈式异步发电机仍是目前国内外异步发电机的主要发电模式，但近几年，直驱PMSM因结构简单，低压穿越能力强等优点，所占比例不断上升。

## 参考文献：

- [1] 崔学深,刘勇鑫,刘其辉等.单机柔直接入的双馈风力发电系统低电压穿越控制方法 [J/OL].现代电力:1-12[2023-08-29].DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0476.
- [2] 霍智伟,裴旭东.基于 FCS-MPC 的风力发电系统低电压穿越技术研究 [J].机电信息,2023(13):78-81.  
DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2023.13.020.
- [3] 张艳,魏慧慧.基于风力发电系统低电压穿越技术研究 [J].电气传动自动化,2023,45(02):11-15.
- [4] 朱智博.双馈风力发电系统低电压穿越关键技术 [J].电气时代,2022(11):40-42.
- [5] 章心因,李皓宇,朱一闻.直驱式 PMSG 风力发电系统 LVRT 分段控制研究 [J].南京工程学院学报(自然科学版),2021,19(04):38-44.DOI:10.13960/j.issn.1672-2558.2021.04.007.
- [6] 王辉,王艺霏,王姗姗等.基于动态电压指令值变化的双馈异步风力发电系统高低电压穿越控制策略 [J].高压技术,2022,48(09):3680-3688.DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20210730.
- [7] 蒋晓萱,章心因,吕干云等.直驱风力发电并网运行及低电压穿越 [J].电工技术,2021(13):41-43+47.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2021.13.011.
- [8] 王若谷,张若微,王明杰等.提升双馈风力发电系统低电压穿越能力的跟踪控制方法 [J].电力工程技术,2021,40(02):185-191.

## 作者简介：

刘卓恒、19950728、男、汉、辽宁省朝阳市，学士学位、初级工程师、主要研究方向或主要从事工作，从事新能源项目的开发管理运营。