

# Research on High-voltage Ride-through Control Strategy of Direct Drive Wind Farm

Yapeng Zhang<sup>1</sup> Enyang Wang<sup>2</sup> Liang Qi<sup>3</sup> Fan Ding<sup>1</sup>

1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Yinchuan, Ningxia, 750011, China

2. Hohai University, Changzhou, Jiangsu, 213022, China

3. State Grid Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan, Ningxia, 750011, China

## Abstract

The threat of power grid fault caused by high voltage to the security and stability of power grid has become increasingly serious, so it is particularly important to study a control strategy. In this paper, the technical specifications of high-voltage crossing in various countries are briefly introduced, the faults can be divided into two categories due to the different causes and degrees of the faults. In addition, taking the permanent magnet direct drive wind turbine as an example, the transient characteristics of PMSG high voltage failure are analyzed, and a high voltage crossover control scheme based on PMSG is proposed.

## Keywords

direct drive wind; high pressure ride through; control strategy

## 直驱风电场高电压穿越控制策略研究

张亚鹏<sup>1</sup> 王恩阳<sup>2</sup> 亓亮<sup>3</sup> 丁帆<sup>1</sup>

1. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 中国·宁夏 银川 750011

2. 河海大学, 中国·江苏 常州 213022

3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 中国·宁夏 银川 750011

## 摘要

由高压导致的电网故障对于电网的安全性和稳定性的威胁变得日益严重, 研究出一种控制策略变得尤为重要。论文对各国高压穿越的技术规范进行了简单介绍, 由于故障产生的原因和程度的不同可以将故障分为两类。此外, 利用永磁直驱风电机组进行举例, 对PMSG高压失效时的瞬变特性进行了分析, 提出了一种基于PMSG的高压穿越控制方案。

## 关键字

直驱风; 高压穿越; 控制策略

## 1 引言

节能减排、挖掘可再生能源, 对于国家能源安全、环境保护和经济发展都有着十分重要的作用。风能、太阳能、水能等, 是目前最具发展潜力的发电方式, 其技术已逐步成熟, 得到了越来越多的应用。随着高压直流输电技术在新能源电力传输领域的迅速发展, 新能源并网的电压猛增已呈现出新的特点, 而针对交流输电架构的高电压穿越规范已不能描述其要求。因此, 对高压跨流控制策略的研究就显得尤为重要。

**【作者简介】**张亚鹏(1987-), 女, 中国吉林长春人, 硕士, 工程师, 从事电网规划设计、电力系统稳定分析研究。

## 2 风电高电压穿越技术标准简介

### 2.1 澳大利亚技术标准

当前, 高压穿越技术在新能源装置上尚处于探索阶段, 而世界上新能源装置中高压穿越技术尚不完善。澳大利亚在制定高电压跨风电场标准上处于领先地位。澳大利亚指出, 当电力网的电压幅度达到 1.3p.u. 时, 电力系统应该继续在网络上工作 60ms, 而从 1.3p.u. 恢复到 1.1p.u. 的期间, 必须在 900ms 内保持与电网的联系, 同时还要协助电网完成电网的电压恢复<sup>[1]</sup>。

### 2.2 美国技术标准

美国 WECC 的并网指南要求有 4 项关于电网电压突然上升幅度的标准, 并且在每一项准则中都明确了风力发电系统的网络运行时间。在网络电压突然升高到 1.2p.u. 的情况下, 风力发电装置需要在 1s 内与电网连接; 如果电

网电压突然上升到 1.18p.u., 风力发电装置必须在 2s 内与电网连接; 如果电网电压突然上升到 1.15p.u., 风力发电装置必须在 3s 内与电网连接; 如果电网电压突然上升到 1.1p.u., 风力发电机必须与电网连接。

### 2.3 中国技术标准

2017 年 8 月, 国家能源局颁布了 NB/T 31111—2017 的《风电机组高压穿越试验规范》。以上标准对中国高压通过试验的具体要求进行了详细说明: 当电网电压突然升高到 1.3p.u. 时, 风力发电设备必须维持 200ms 的并网运行; 上升到 1.25p.u. 时, 维持 1000ms 的并网运行; 升高到 1.2p.u. 时, 维持并网运行 2000ms; 上升到 1.15p.u. 时, 保持并网运行 10s; 飙升到 1.1p.u. 后, 风电机组需要持续保持并网运行。

## 3 高压故障的形成原因

无功功率是造成高电压失效的重要因素, 高压故障按失效原因和严重程度可划分为两种类型: ①由电网中的交流系统故障引起的高压故障, 这种高压故障的发生率比较低, 一般情况下, 新能源机组不会发生过调或不控制整流。这种故障在下文中被简单地称为低电压故障。②直流系统封闭引起的高压故障, 这种高压故障的发生率比较高, 一般情况下, 新能源机组的 GSC 都会发生过调或不控制整流。这种故障在下文中被简单地称为高压深故障。

实际上, 在实际的电网中, 通常会出现如下情况: ①在单相接地失效后, 单相重合会引起三相非对称高压; ②高能电力装置的突然切断导致电网电压的急剧上升; ③在电力系统中, 由于电力系统的无功负荷, 导致了电力系统的电压急剧上升。从电力系统的实际运行来看, 电网交流系统的高电压失效概率很小, 通常不会超过 1.3p.u.。从前面的高电压穿越技术标准来看, 各国的高压穿越标准大都是针对这种故障而制订的<sup>[2]</sup>。

近年来, HVDC 技术因其在利用新能源、优化能源结构等方面的诸多优点而迅速发展。由于新能源基地多集中在西北, 所以直流输电的馈线网络较弱, 短路能力较差。特别是在直流系统发生单极闭锁、双极闭锁、换相失效等情况下, 会引起换流站和邻近变电站的瞬时电压上升。

弱馈线直流系统的短路电流 SCR 值一般在 3 以下, 根据图 1 以及实际情况可知, 弱馈线直流系统发生的高压故障是比较严重的, 一般为 1.3p.u.。这种故障在很多国家都没有列入高压穿越标准, 如果不对这种高电压的故障进行有效的控制, 很可能造成新能源设备的大规模脱网, 从而危及新能源的安全和稳定运行。

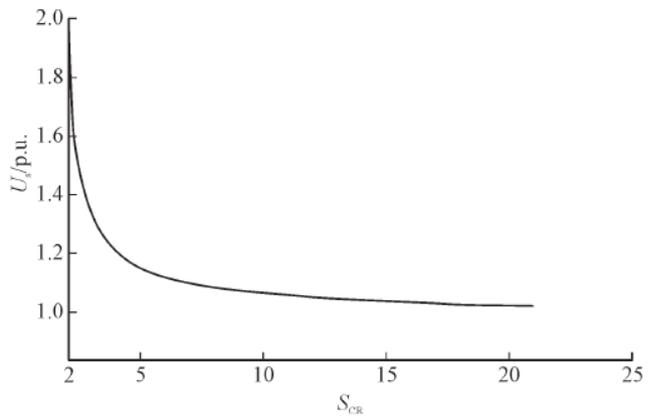


图 1 HVDC 直流封闭后电压与短路比关系

## 4 PMSG 高电压穿越方法

### 4.1 PMSG 模型

PMSG 风电机组由四大部分组成, 分别为: 桨距调节风力机、永磁同步发电机、背靠背全功率变频调速装置和控制系统。将螺距调节型风力发电机与永磁同步发电机直接相连, 无需用到减速变速箱, 通过发电机变频整流, 用电容支持发电机, 通过电网侧变频装置向电网输送电能, 模型如图 2 所示。

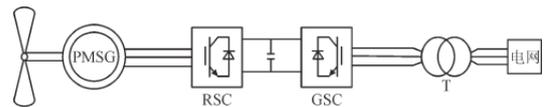


图 2 PMSG 模型

PMSG 模型是一个变量多、强耦合的非线性系统, 在三相静态坐标系中难以进行分析与设计。利用坐标变换, 把它转化为任意的 dq 坐标系统。

PMSG 以变频调速作为其控制核心, 目前市场上的风机使用多为双电平, 两个 PWM 电压型变流器是由 DC 直流母线相连的。两种变流器均能在整流或逆变工况下工作, 在转子端附近的叫做 RSC 或 MSC, 而直接连接到电网的则是 GSC。这种结构的变换器可以在发电机的转子与电网之间使用, 也可以在发电机的定子与电网之间使用<sup>[3]</sup>。

PMSG 机端换流器的解耦控制一般是由转子磁链定向来完成的。在常规情况下, 有功控制必须使风力发电系统获得最大的风能, 而在无功功率控制方面, 要根据电网和风力发电的需求, 达到不同的控制目的。PMSG 网侧的换流器一般都是利用电网的电压方向向量来进行解耦, 在常规情况下, 直流汇流端的电压通过电网一侧的换流器保持恒定, 从而间接地使机侧和网侧的有功功率得到均衡, 同时对电网侧的电力输出进行功率因数的控制。在跨网过程中, 网侧换流

器还可以提供相应的无功，以支持电网的电压。

## 4.2 PMSG 穿越方法

在电网电压急剧上升过程中，PMSG 的 HVRT 性能与 GSC 的控制性能有着很大的关系。GSC 的工作性能取决于其额定电压和最大工作电流，具体研究如下：

①目前的风机 GSC 普遍采用 PWM 模式，按照电压空间向量调制的原理，为了使其不会发生过调制， $m$  需要满足下列条件：

$$\sqrt{U_{gd}^2 + U_{gq}^2} \leq \frac{U_{dc}}{m} \quad (式 1)$$

公式 1 表示，直流母线限制了最大电压值。

三相无控制整流直流电压的平均值是：

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{2\pi+\alpha} \sqrt{6}u_s \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_s \cos \alpha \quad (式 2)$$

目前市场上 PMSG 风机的直流母线电压通常是 1100V，PMSG，有效的并网线电压  $U$  是 690V，依据式 1 和式 2 可知，在没有发生过调制的情况下，最小的 DC 汇流端电压  $U_{dcN min}$  应该是：

$$U_{dcN min} = U/3 \times 2.34 = 932 V \quad (式 3)$$

一般地，风机直流母线电容电压可以有 0.1 p.u. 的偏差，所以目前市面上普遍使用的风机直流母线的最大极限  $U_{dcN max}$  大约是：

$$U_{dcN max} = U_{dcN} \times 1.1 = 1 210 V \quad (式 4)$$

因此，从公式 3 和公式 4 中可以得出，风机所能经受的高压失效的限度大约是：

$$U_{dcN max} \div U_{dcN min} \approx 1.3 p.u. \quad (式 5)$$

从公式 5 可以看出，当电网高电压不超过 1.3p.u. 时，风机的 DC 端电压和 GSC 均处于可控范围，根据并网导则，风机可以根据电网的要求对电网进行相应的无功补偿。

② GSC 在正常工作时不能超过它的最大电流  $I_g$ ，以免对电源设备造成损害。在故障初期，由于故障的探测与控制延迟以及在瞬时的电力冲击，会造成 GSC 过流和直流母线过电压，这时可以通过撬棒电路来释放能量来保护风机。在故障持续时间内，由于风机的有功、无功均能被独立控制。为了保护装置，并确保风机具有充分的无功能力，可以将有功功率降低到 0。同时，按照并网导则，对风机进行了相应的电容无功支持。在故障恢复过程中，存在着直流母线电压或 GSC 电流的瞬时波动，从而引起撬棒线路的重新启动<sup>[4]</sup>。

## 4.3 PMSG 控制策略

根据上述研究分析，下面给出了 PMSG 跨线控制的策略。

### 4.3.1 故障初发阶段

在故障初期，由于故障的探测与控制延迟，以及在瞬时的电力冲击，从而产生 CSC 过流和直流母线过电压，通

过撬棒电路来释放能量可以保护风机。一般情况下，撬棒线路的两种保护电路为 Crowbar 和 Chopper。在电力系统的故障跨越方面，Chopper 电路的应用更为广泛。Chopper 保护是利用 IGBT 控制的 Chopper 电阻器，并与 DC 汇流电容器连接，以减少过多的瞬时脉冲能量，保护结构如图 3 所示。

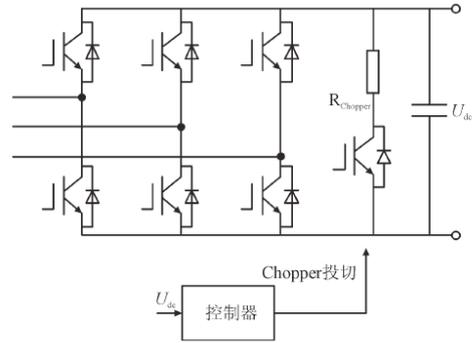


图 3 保护结构图

### 4.3.2 故障发生期

在故障发生中期，当发生浅值高压故障时，直流汇流电压及电网端的换流器仍可进行控制。当出现故障时，可以进行母线的自动均衡，不需要运行保护电路，这时 PMSG 处于可控制的状态。PMSG 在正常的电压下工作，当电压突然升高，检测到直流母线的过压时，立即进入 Chopper，在暂态冲击减弱后，Chopper 停止工作。如果在这个时候，电网的电压还没有恢复，PMSG 就会进入到故障控制的状态。

### 4.3.3 故障修复期

在故障恢复过程中，由于各系统的有功、无功均能独立控制，使得并网导则中的电力恢复需求更易于实现。这时，控制系统又回到了故障之前的状态。当电力系统发生故障时，由于监测和控制延迟，无法在故障持续时间内及时切断风电机组的无功功率，同时也会出现电网过压的情况，从而使其重新投入使用。

## 4.4 PMSG 与无功补偿装置协同穿越方法

PMSG 系统在高压状态下，不仅无法产生无功功率，而且还必须通过 Chopper 的连续动作来保护逆变器的直流母线，从而导致了系统的故障恢复。所以，可以考虑利用集中式无功补偿装置来吸收和抑制电网的无功功率，在一定程度上对其产生抑制，从而将高压故障降到浅度高压故障，从而有利于风电机组的 GSC 的可控性。基于以上分析，论文提出将集中式无功补偿与风电机组联合运行的方法，可以提高电网的跨电压容量。

目前，采用柔性交流传输技术 (FACTS) 作为新型电力系统中较为常用的无功补偿设备，其主要由静止无功补偿 (SVC)、静止同步补偿 (STATCOM) 和同步调相机 (SC) 构成。

## 5 结语

论文主要研究了直接驱动风电机组高压通过的控制策略。得出的结论如下:

①造成电网出现高压故障的原因是多方面的,但主要还是无功功率过剩所致。高压故障按其发生的原因和程度可划分为两种类型:一种是由于交流系统的故障引起的浅高压故障,另一种是由于直流系统的封闭引起的高压故障。针对这两种类型的高压故障跨越,直驱风电场的运行策略是不同的。

②当高压发生时,直接驱动的风力发电机不仅不能产生无功,还必须通过 Chopper 的连续动作来释放能量来保护直流母线的电容。在这种情况下,所产生的谐波、非线性电流将严重地影响到电力系统的故障恢复。采用集中式无功补偿器对电网无功进行吸收,可以有效地降低并网处的过电压

幅度,有利于风电机组 CSC 的可控性。在此基础上,采用集中式无功补偿与风力发电系统进行无功联合控制,可以有效改善直流输电系统的跨电压能力。

③为了避免 STATCOM 在高压下发生过调或不受控制整流时,STATCOM 直流母线的额定电压应该比较高,推荐为标准设计的 1.3 倍。

### 参考文献

- [1] 邹欣,李晖,赵晟凯,等.直驱风电场高电压穿越控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):191-198.
- [2] 蒋子傲,崔双喜.基于混合储能系统的高电压穿越控制策略[J].电测与仪表,2022,59(3):125-130.
- [3] 邵亚秋,许恩泽,孙健,等.直驱变频器高电压穿越控制策略研究[J].电器与能效管理技术,2015(12):50-54.
- [4] 张旭光.双馈风力发电机高电压穿越控制策略研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.