

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209184

风电场无功与电压控制技术研究综述

吴昊¹, 于景龙², 杨政厚³, 韩健³, 任鑫¹, 李春廷⁴, 史祥⁴, 李邦兴¹

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 华能吉林发电有限公司新能源分公司, 吉林 长春 130012;

3. 北京华能新锐控制技术有限公司, 北京 102209;

4. 华能新能源股份有限公司, 北京 100036)

[摘要] 随着风电场规模的增加和风电发电量在能源体系中的占比不断增大, 电网对于风电场的电压稳定性要求越来越高。重点分析了风电场的实际运行现状, 提炼总结了风电场无功与电压控制面临的关键问题, 包括风电机组如何参与无功出力、大规模风电场的无功功率如何分配、风电场内部节点电压如何保持稳定、如何解决电压控制滞后、故障状态下的暂态电压控制策略等。针对这些问题, 系统综述了国内外风电场无功与电压控制技术的方法和特点, 从风电机组和无功补偿装置的特性、无功与电压稳态控制、内部节点电压控制、模型预测控制、故障状态下暂态控制等角度, 阐述了风电场无功与电压控制技术的实现过程, 为风电场安全稳定运行提供可靠的技术手段。

[关键词] 风电场; 无功功率; 电压控制; 风电机组; 无功补偿装置

[引用本文格式] 吴昊, 于景龙, 杨政厚, 等. 风电场无功与电压控制技术研究综述[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 26-38.
WU Hao, YU Jinglong, YANG Zhenghou, et al. Review of reactive power and voltage control technologies in wind farm[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 26-38.

Review of reactive power and voltage control technologies in wind farm

WU Hao¹, YU Jinglong², YANG Zhenghou³, HAN Jian³, REN Xin¹, LI Chunting⁴, SHI Xiang⁴, LI Bangxing¹

(1. China Huaneng Clean Energy Technology Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. New Energy Branch, Huaneng Jilin Power Generation Co., Ltd., Changchun 130012, China;

3. Beijing Huaneng Xinrui Control Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4. Huaneng New Energy Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: With the increase of the scale of wind farms and the proportion of wind power in energy system, the power grid has higher and higher requirements for the voltage stability of wind farms. The actual operation status of wind farms is focused, and the key issues of the reactive power and voltage control of wind farms are summarized, including how wind turbines adjust the reactive power, how to allocate the reactive power in large scale wind farms, how to maintain the stability of the internal node voltage of wind farms, how to solve the problem of voltage control lag, the transient voltage control strategy under fault conditions, and so on. In view of these issues, the methods and characteristics of reactive power and voltage control technology in wind farms are systematically summarized, and the realization process of reactive power and voltage control technology is expounded from the aspects of the characteristics of wind turbines and reactive power compensation equipment, reactive power and voltage steady-state control, internal node voltage control, model predictive control, and transient control under fault conditions. The research can provide reliable technical means for safe and stable operation of wind farms.

Key words: wind farm; reactive power; voltage control; wind turbine; reactive power compensation equipment

随着“双碳”目标的提出, 我国风电行业得到前所未有的发展。风电在全国能源中占比的不断增长和风电场规模的不断扩大会在风电场接入电网

时引起电压、功率和频率的波动。其中, 风电场并网点电压波动问题已成为限制我国风电行业发展的主要问题之一^[1]。风电机组在接入电网后, 受到

收稿日期: 2022-09-07 网络首发日期: 2022-10-19

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-H56)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H56)

第一作者简介: 吴昊 (1994), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为新能源发电技术, h_wu@qny.chng.com.cn.

环境影响其发电功率不断变化,将会对整个电力系统的潮流分布产生巨大影响,进而导致并网点电压变化。为了使并网点电压维持在较稳定的正常范围内,就需要深入研究风电场无功与电压控制技术。根据《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963—2011)的要求:当公共电网电压处于正常范围内时,风电场应当能够控制并网点电压在标称电压的97%~107%内;当风电场并网点电压在标称电压的90%~110%时,风电机组应能正常运行。

由于风电场输电线路的等值电抗一般远远大于等值电阻,因此调节并网点电压主要依靠风电场对无功功率的调节。根据电网相关的风电场并网要求,风电场都必须具备一定的无功调节能力。对于直接接入公共电网的风电场,其配置的无功容量应能够补偿风电场满发时全场无功功率的1/2;对于通过220 kV(或330 kV)风电汇集系统降压至500 kV(或750 kV)电压等级接入公共电网的风电场群中的风电场,其配置的无功容量应能够补偿风电场满发时全场无功功率。风电场的无功电源包括风电机组及风电场无功补偿装置,然而,目前的风电场大都是通过无功补偿装置进行无功功率调节,风电机组的无功调节能力没有得到充分利用。因此,当前的风电场无功与电压控制技术研究大都是通过研究风电机组和无功补偿装置的无功功率分配策略来展开。

风电场无功与电压控制技术的优势包括2个方面:1)降低线路损耗,在稳定电网电压时尽量使线路损耗最小;2)提高电压质量,通过合理配置无功功率减小电压波动。风电场无功与电压控制技术能够保证风电场安全经济地运行^[2]。

由于风电机组受环境因素影响较大,且风电场潮流模型复杂,风电场无功与电压控制面临诸多关键问题,例如,风电机组的无功调节特性问题、大规模风电场无功功率分配、风电场内部节点电压稳定性、电压控制滞后、故障状态下的暂态电压控制等一系列风电场无功与电压控制的难点与痛点问题,亟需理论与技术的突破。

为此,本文分析了风电场的发展概况和技术特点,提炼总结了风电场无功与电压控制关键问题,结合团队在风电场运维工作的多年工程经验,从风电机组和无功补偿装置的特性、无功与电压稳态控制、内部节点电压控制、模型预测控制、故障状态下的暂态电压控制等方面总结了风电场无功与电

压控制的技术特点,并阐述其实现过程,为风电场运行控制的技术发展提供参考,切实服务于风电场的安全稳定运行。

1 风电场无功与电压系统

根据国家能源局数据,截至2022年3月底:我国发电装机容量约24亿kW,其中风电装机容量约3.4亿kW,占比14.2%;发电量约19922亿kW·h,其中风电发电量约1833.4亿kW·h,占比9.2%。

本文重点关注风电场无功与电压系统,当前主要通过自动电压控制(automatic voltage control, AVC)系统进行电力系统的电压控制。AVC系统在智能电网发展和电网性能升级方面具有重要作用。在电网中,AVC系统包括主站和子站2部分。主站设置在电力调度中心的系统,负责分析计算数据和发出控制指令;子站设置在风电场、变电站等场所的系统,负责接收并执行主站发出的指令并反馈相关信息。风电场可以对子站进行改造升级,将无功与电压控制策略部署在子站,主站仅需要下达无功和电压的调节目标,子站可以通过设定的无功与电压控制策略进行无功分配计算并执行控制指令。

风电场的无功与电压控制模式可分为无功控制模式和电压控制模式。目前AVC控制通常采用无功控制模式,通过给定全场总无功功率设定值,使风电场的无功功率满足电网要求。电压控制模式通过给定并网点电压的设定值,按照无功与电压的关系进行计算,得到所需的风电场无功功率,进而使风电场发出所需的无功功率,使风电场的并网点电压满足电网要求。风电场拓扑结构如图1所示。

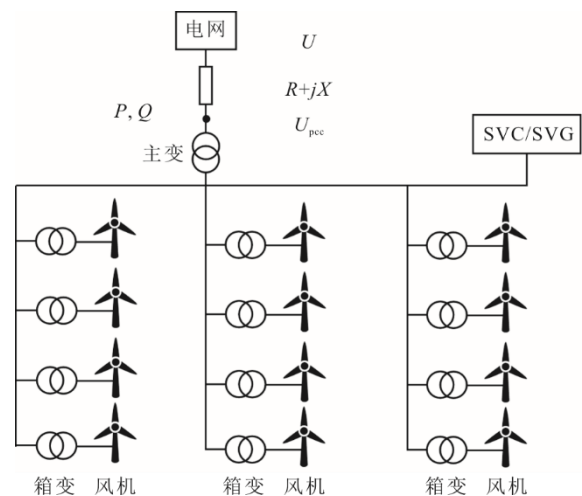


图1 风电场拓扑结构

Fig.1 Topology diagram of wind farm

对并网点的电压进行计算:

$$U_{\text{pcc}} = U + \frac{PR + QX}{U_N} \quad (1)$$

式中: U 为电网电压; U_N 为电网额定电压; U_{pcc} 为并网点电压; P 、 Q 为风电场的有功功率和无功功率; R 、 X 为风电场输电线路的电阻和电抗值。由于风电场的 $X \gg R$, 因此并网点的电压控制主要与全场无功功率有关, 并网点电压与全场无功功率呈线性关系。根据风电场并网点的运行数据, 可以估算并网点的无功电压灵敏度 $K^{[3-4]}$:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{pcc}}}{\Delta Q} \quad (2)$$

式中: K 为并网点无功电压灵敏度系数; ΔU_{pcc} 为并网点变化量; ΔQ 为并网点无功变化量。根据无功电压灵敏度, 可以将并网点电压的设定值转换成风电

场全场无功功率目标值。风电场无功与电压控制系统将全场无功功率目标值进行分配, 控制风电机组和无功补偿装置按照分配策略发出指定无功功率, 从而满足全场对无功功率的需求并起到稳定电压的目的。

2 风电场无功与电压控制关键问题

围绕风电场的安全稳定运行, 总结其无功与电压控制技术的关键问题。首先, 从理论和工程角度分析风电机组与无功补偿装置的无功特性; 然后, 详细分析无功与电压控制优化问题, 针对风电场运行面临的实际关键问题进行阐述, 进一步分析风电场无功与电压稳态控制、内部节点电压稳定性、电压控制滞后、故障状态下暂态电压稳定性等问题。图 2 给出了当前风电场无功与电压控制方法概况。

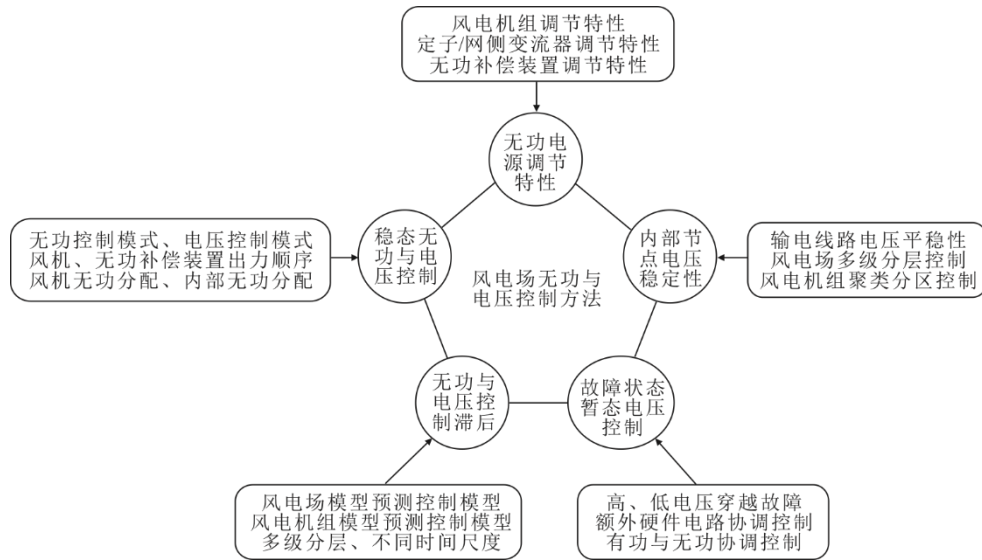


图 2 风电场无功与电压控制方法总体概况

Fig.2 General overview of reactive power and voltage control methods in wind farms

2.1 风机和无功补偿装置的无功特性

风电机组主要可分为定速异步机组、双馈异步机组、永磁直驱机组、半直驱机组。定速异步机组运行时需从电力系统中吸收无功功率, 不具备无功调节能力。双馈异步风电机组可通过定子和网侧变流器发出无功功率^[5-10]。定子的无功功率极限值为:

$$Q_{s \max} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m}{2X_s} I_{r \max}\right)^2 - P_s^2} \quad (3)$$

$$Q_{s \min} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m}{2X_s} I_{r \max}\right)^2 - P_s^2} \quad (4)$$

$$P_T = P_s - P_c \quad (5)$$

$$P_c = sP_s \quad (6)$$

$$P_s = \frac{P_T}{1-s} \quad (7)$$

式中: $Q_{s \max}$ 和 $Q_{s \min}$ 为定子的最大和最小无功功率; U_s 为定子电压有效值; X_s 和 X_m 为定子和励磁电抗; P_c 、 P_s 和 P_T 为转子侧、定子侧功率和输出机械功率; $I_{r \max}$ 为转子电流最大限制; s 为转差率。

网侧变流器的无功功率极限值为:

$$Q_{c \max} = \sqrt{S_n^2 - P_c^2} \quad (8)$$

$$Q_{c \min} = -\sqrt{S_n^2 - P_c^2} \quad (9)$$

式中： $Q_{c\max}$ 和 $Q_{c\min}$ 为网侧变流器的最大和最小无功功率； S_n 为网侧变流器的额定容量。

双馈异步风机的无功功率极限值为：

$$Q_{\max} = Q_{s\max} + Q_{c\max} \quad (10)$$

$$Q_{\min} = Q_{s\min} + Q_{c\min} \quad (11)$$

永磁直驱风电机组和半直驱风电机组的无功功率由变流器的额定容量决定，其无功功率极限值为^[11]：

$$Q_{\max} = \sqrt{S_n^2 - P_T^2} \quad (12)$$

$$Q_{\min} = -\sqrt{S_n^2 - P_T^2} \quad (13)$$

上述分析给出了风电机组的理论无功功率极限值，然而在实际工程中，出于安全性考虑，一般都会对风机的功率因素进行限制。根据 GB/T 19963—2011 的要求，风电机组应满足功率因数在超前 0.95~滞后 0.95 的范围内动态可调。

无功补偿装置主要有同步调相机、并联电容器、并联电抗器、静止无功补偿器（static var compensator, SVC）、静止无功发生器（static var generator, SVG）等，无功功率极限值由其额定容量决定。文献[12]对风电场的 SVC 和 SVG 进行了性能比较，结果表明，SVG 比 SVC 响应速度更快，损耗更少，且不引起电网谐振。随着无功补偿装置无功功率的增加，其散热等消耗的有功功率也会增加，进而增加风电场的自耗电。同时，集中式无功补偿装置仅能对并网点电压起到电压支撑作用，对于输电线路和风电机组的电压无法起到支撑作用。此外，如果在风电场设计之初考虑风电机组的无功调节能力，可以减少无功补偿装置的容量配置，从而节省建设成本。因此，需要在保证无功调节速度的同时，尽可能挖掘风电机组的无功调节能力^[13]。

2.2 无功与电压稳态控制

早在 20 世纪 60 年代，针对传统电力系统的控制方法研究就已开展。风电场和传统电力系统的无功与电压控制优化问题类似，核心都是潮流优化问题。风电场电力系统优化是由多个优化目标和多个约束条件组成的非线性优化求解问题，当前关于无功与电压控制优化问题的研究主要集中在目标函数、约束条件、优化算法 3 个方面。

风电场无功与电压控制优化问题的目标是全场无功功率满足电网需求，控制并网点电压稳定，减少输电线路上的有功损耗。

对于无功控制模式，目标函数为最小化全场无功功率与无功功率设定值的偏差：

$$\min \|Q - Q_{\text{ref}}\| \quad (14)$$

式中： Q_{ref} 为风电场的无功功率设定值。

对于电压控制模式，目标函数为并网点电压与并网点电压设定值的偏差：

$$\min \|U_{\text{pcc}} - U_{\text{pcc,ref}}\| \quad (15)$$

式中： $U_{\text{pcc,ref}}$ 为风电场的并网点电压设定值。

此外，在许多研究中考虑到最小化输电线路的有功损失^[2]：

$$\min \sum_{j \in i}^{i \in n} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (16)$$

式中： G_{ij} 和 $\cos \theta_{ij}$ 为节点 i 和 j 之间的电导和电压相角差； U_i 和 U_j 为节点 i 和 j 的节点电压。

约束条件包括风电场的潮流平衡方程、并网点电压约束、风机无功约束、无功补偿装置无功约束。并网点电压约束按照额定电压的 97%~107% 限制，风机无功功率按照功率因数的 -0.95~0.95 限制。

优化算法可以采用传统数学优化方法，利用非线性规划求解，但在求解过程中存在求导运算，计算速度较慢且得到的不是全局最优解。近年来，学者们提出了人工智能优化算法，包括禁忌搜索法、模拟退火法、遗传算法、粒子群算法等，也逐渐在电力系统中得到广泛应用。

2.3 风电场内部节点电压控制

大多数风电场无功与电压控制方法仅仅考虑到并网点电压控制，没有对风电场内部节点电压的稳定性进行分析。风电机组之间通过输电线路连接，风机无功出力对输电线路各个节点的电压分布产生重大影响^[14]。大规模风电场受到地形地势的限制，导致空间跨度广，输电线路较长。由于无功功率需要从风机端向并网点流动，因此风机端电压随着输电线路不断升高，在输电线路末端达到最高点。当需要风电场输出无功功率以支撑并网点电压或调节并网点功率因数时，位于输电线路末端的风机可能因高压越限而脱网，从而影响系统安全运行。图 3 展示了某风电场的输电线路电压分布情况^[15]。

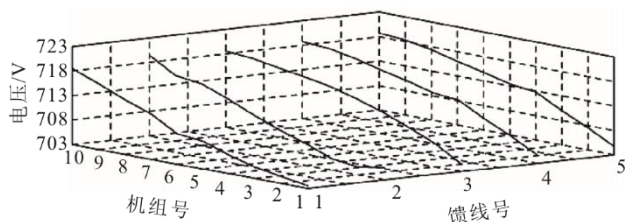


图 3 某风电场输电线路电压分布
Fig.3 The voltage distribution diagram of transmission lines of a wind farm

针对大规模风电场并网导致的电力系统潮流波动和电压偏移问题,在风电场发电量达到一定规模后,需要采用合理的分层分区策略进行优化控制。电压分层分区作为电压控制的重要手段,可以将风电场划分为若干个具有电压稳定性的区域。分层分区得到的子区域之间呈现较弱的耦合特性,同一区域内各节点耦合性较强。

2.4 无功与电压控制滞后问题

由于大多数风电场位于偏远地区,远离负荷中心,对电网的主动支撑能力不足,导致电网电压容易受到风电场有功、无功出力的影响,且风电功率存在随机性和波动性,受风速影响容易出现大幅度功率波动,导致电网电压波动。风电场无功与电压控制技术如果仅基于当前状态进行优化控制,没有考虑不同时间尺度设备间的协调和对系统未来状态的影响,容易出现控制滞后的问题。

目前,风电场都设置有风功率预测系统,但没有形成闭环控制,且超短期功率预测也仅仅是预测未来 15 min 的功率,而风机无功出力的响应时间在秒级,无法用于风电机组的无功与电压控制策略。为了解决风电机组的电压滞后控制问题,可以采用模型预测控制(model predictive control, MPC)技术,以当前风机的运行状态为基础,预测未来一段时间风机的运行状态,从而实现有限时间内的最优控制。目前, MPC 在新能源发电和微电网的无功协调调度中已经有一些相关研究和成果应用。

2.5 故障状态下的暂态电压控制

为保证风电场在全工况条件下的电压调节能力,需研究故障状态下的暂态电压控制问题^[16]。

由于风电场故障后需要调节大量无功功率,导致电网暂态电压失稳,因此故障状态下的暂态电压控制就是要实现无功功率的实时就地平衡^[17]。风电场的电压故障可分为低电压穿越和高电压穿越,前者主要针对电网发生短路故障情景,后者主要针对电网发生局部过电压情景。

低电压穿越一般包括电网单相接地短路、两相接地短路、两相短路、三相短路等故障类型,引起并网点电压跌落。对于双馈风机,风机输出电磁转矩会随着电压跌落迅速降低,而输入机械转矩并未变化,二者之间出现差值就会导致转子加速,吸收更多无功功率。如果不对系统进行无功补偿,将造成更大无功缺额,电网电压会进一步跌落。同时,双馈风机的定子电压跌落会通过电磁耦合在转子

上感应出严重的过电流,不平衡的功率会导致直流电容充电,直流母线电压超过额定值,进而烧坏转子侧和网侧变流器中的元件。对于直驱和半直驱风机,电压跌落导致网侧电流增加,达到变流器限流幅值后不会继续增大,网侧变流器向电网输出的功率减小,风机输出功率和网侧输出功率产生功率差,存储到直流侧电容导致直流母线电压继续升高,也会导致转子侧和网侧变流器中的元件损坏。如果风电机组采用脱网方式保障安全,可能导致其他机组的连锁脱网,严重影响风电场和电网的安全运行稳定性。

2.1 节分析了风电机组的无功调节范围,其理论上上下限受到有功功率的限制。在有功功率输出较大的情况下,风电机组的无功调节能力较小,风电场独立的无功调节能力就很难维持电压稳定的无功需求。当电网发生故障时,风电场需维持一段时间与电网连接不脱网,甚至要求风电场在电网发生故障时能提供无功功率以支撑电网电压的恢复^[18]。GB/T 19963—2011 也对并网风电机组的低电压穿越能力进行了明确规定。

高电压穿越一般有雷电过电压、操作过电压、工频过电压、谐振过电压 4 种类型。单相短路、两相短路、负荷突然变换、开关操作等都可能造成电网过电压情况^[19]。与低电压穿越问题不同,风电场高电压穿越问题主要发生在大规模风电场直流送出场景。当直流发生换相失败或闭锁后,换流站滤波电容和无功补偿装置产生的过剩无功功率会导致送出端交流母线暂态过电压,造成风电机组存在高压脱网的风险。

对于双馈异步风机,高电压穿越会导致风机定子磁链大幅震荡,相对异步发电机产生较大转差率,造成转子侧过电压和过电流;同时,对绝缘部分也会产生损耗、击穿甚至设备损坏。对于直驱和半直驱风机,发电机经变流器与电网相连,高电压穿越会导致电网向风机注入逆向功率,由于变流器的输入和输出能力不平衡,造成变流器电压急剧上升。在高电压穿越时,除了要求风机提供一定感性无功支撑电网电压外,对风机的有功功率也需要限制,以保障电网频率稳定性。

3 风电场无功与电压控制方法

3.1 无功与电压稳态控制技术

在风电场稳态运行情况下,针对无功与电压控

制技术的研究主要从风电场控制和风电机组控制2个方面进行。

风电场控制主要包括等裕度分配、风电场传输损失最小化、风电场总损失最小化3种控制策略。当前应用最广泛的是基于风机无功裕度的无功分配策略,该策略实现方式简单,但未考虑风电场内部运行损耗及电压分布^[6,20]。文献[21]提出了基于风电场传输损失最小的无功优化模型,并利用粒子群算法进行求解。文献[14]提出了一种以风机有功功率最大和线路损失最小为目标的方法。文献[22]详细比较了等裕度分配、风电场传输损失最小化、风电场总损失最小化3种控制策略。文献[23]针对风机和无功补偿装置无功分配方式的稳定性进行了研究,结果表明,无功补偿装置优先策略稳定性最好,风机和无功补偿装置均半策略次之,风机有限策略稳定性最差。文献[24-25]指出,在稳态情况下,无功出力顺序依次为风机、无功补偿装置(SVC或SVG优先,并联电容器电抗器次之)、主变分接头;暂态情况下,由无功补偿装置发出无功,暂态结束后由风机发出无功。

对于双馈风机内部的无功分配策略,多数文献通过对风机模型进行推导,证明定子侧的无功极限值优于网侧变流器的无功极限值,定子侧发出无功应该优先网侧变流器发出无功^[26-29]。文献[30]对比分析了多种风机内部无功分配策略,指出在不同无功参考点采取不同的无功分配策略能够减少风电场总体损耗。

综上所述,在研究风电场无功与电压控制策略时应考虑风电场的有功损耗。在稳态情况下,无功调节的优先顺序建议为风电机组、SVC或SVG、并联电容器电抗器、主变分接头,此时可最大发挥风电机组的无功调节能力;在暂态情况下,无功调节的优先顺序建议为SVC或SVG、并联电容器电抗器、风电机组、主变分接头,此时可快速提供无功以支撑并网点电压;双馈异步风机内部无功调节的优先顺序建议为定子侧、网侧变流器。

3.2 内部节点电压控制技术

针对风电场内部节点电压的稳定性,一类方法是考虑机端电压进行控制,另一类方法则是风电场分层分区进行控制。

考虑机端电压主要是通过减小风机机端电压与风机额定电压的偏差,或者减小风机机端电压之间的偏差,结合减小网损等其他目标进行优化控

制。文献[15,31-32]主要采用了以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制方法,结果表明,考虑机端电压后进行风机无功分配能够显著改善输电线路上的电压稳定性。也有文献以减小风电机组间的电压差异性为目标,能够改善输电线路电压水平^[33-34]。

风电场分层分区控制主要包括基于地理区域、基于启发式算法、基于复杂网络、基于聚类算法的划分方法。基于地理区域的划分需要构建节点灵敏度矩阵和计算节点电气距离,综合考虑了节点地理位置上的相关性。基于启发式算法的划分可以利用人工智能优化算法,从数学角度求解优化问题的最优解集进行电压分层分区。基于复杂网络的划分从拓扑角度研究电力系统图,将图论引入风电场电力系统。基于聚类算法的划分可以利用风电场运行数据,将具有相同或相近特征的对象进行分类。

在风电场的分层方法中,通常将风电场群划分为场群层、子场层、机组层^[3]。文献[35]提出了三级式风电场AVC协调控制策略,包括风电汇集站优化、场群风机动态分区、AVC子站调整,该策略能够提高控制系统对功率变动的响应速度,提高风功率波动情况下的电压稳定性与系统经济性。对于单个风电场,也有文献将风电场划分为2层进行两级电压控制^[36-41]。文献[41]表明,采用分层控制策略比采用全局单级控制策略的速度快。

在风电场的分区方法中,最简单的是将同一条输电线路的风机或者同排风机划分为1个机群进行等效建模,等效机组的容量为分区所有机组容量的加权平均值^[42-43]。然而,这种划分方法并没有利用风机的特征进行分区。目前许多文献都采用K-means聚类算法对风电场所有风机进行分区,将同区的风电机组等值为1台,实现了风电场的动态等值^[44-46]。K-means聚类的指标主要有风机风速、输出功率、机端电压、转差率等。然而,K-means是一种硬聚类方法,会将每台风电机组严格地划分到某类中,类别划分的界限是分明的。实际上风电机组并没有严格的属性,它们在性质和类属方面存在中介性,因此适合进行软划分。模糊C均值聚类算法(fuzzy C means, FCM)描述了样本属于各个类别的不确定性程度,表达了样本类属的中介性,通过优化目标函数得到每个样本点对所有类中心的隶属度,从而决定样本点的类属以达到自动对样本数据进行分类的目的。因此,一些文献采用FCM进

行风电场分区^[47-51]。

综上所述,风电场群可以划分为场群层、子场层、机组层 3 层进行分层控制。对于较多的控制单元可以进行分区控制,将多个控制单元进行等值建模,先进行不同区域的无功分配,然后在区域内部进一步无功分配。风电场分层分区控制能提高控制系统的响应速度,对于分层分区内部结构的电压稳定性也能起到很好的支撑作用。

3.3 模型预测控制技术

模型预测控制结合了最优控制和 PID 控制的理论,包括预测模型、滚动优化、反馈校正 3 个部分。预测模型是利用过去已知的状态信息和未来的控制输入对系统未来的输出响应做出预测。滚动优化是在当前采样时刻,通过优化目标函数确定最优的控制输入序列。反馈校正可以对预测结果和系统的实际响应进行在线修正,克服外部干扰形成闭环控制。模型预测控制结构如图 4 所示。

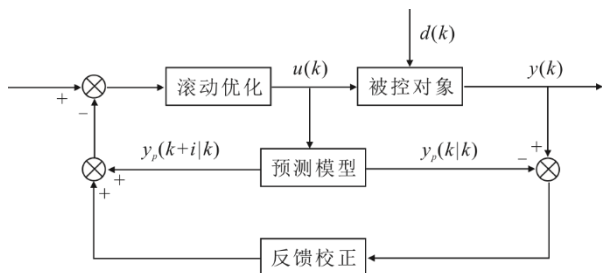


图 4 模型预测控制结构

Fig.4 Structural diagram of model predictive control

目前一些文献利用 MPC 将整个风电场作为被控对象对无功与电压控制进行了研究^[52-58]。针对当前无功电压控制滞后、风电场设备控制不协调的问题,通过覆盖系统级-汇集区域级-风场级-设备级的多层 MPC 无功电压控制策略,实现风电机组、无功补偿装置、变压器分接头的协调控制。对于输电线路阻值较大的风电场,有功对于并网点电压的影响不可忽略,因此文献^[56]还采用 MPC 实现了风电场有功和无功的协调控制。

另外一些文献利用 MPC 将风电机组作为被控对象对无功与电压控制进行了研究^[59-63]。通过建立风机数学模型,以控制性能和成本为目标函数,建立风机有功和无功的数学模型,可以对每台风机都设计一个模型预测控制器。利用 MPC 能够协调优化风电机组、转子侧变流器、网侧变流器、能量存储系统之间的有功和无功功率输出,以及实现不同时间级的有效协调。

综上所述, MPC 可以与分层分区、有功无功协调控制等相结合,进行风电场群、风电场、风电机组的无功与电压优化控制。MPC 适用于处理多输入输出的系统,能及时弥补系统不确定性,实现更好的动态控制性能。

3.4 故障状态下暂态电压控制技术

针对风机低电压穿越问题,一种解决方法是增加额外硬件电路(图 5),另一种则是通过风机控制策略进行控制。

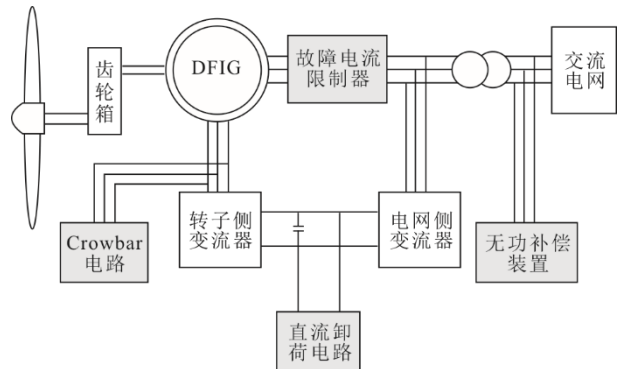


图 5 风电机组增加额外硬件电路

Fig.5 Additional hardware circuits for wind turbines

双馈异步风机主要采用主动式或被动式 Crowbar 来避免风机变流器的过电压和过电流,以提高网侧稳定性和风机的低电压穿越能力^[64-67]。然而, Crowbar 动作前、后的发电机励磁分别由变流器和电网提供,2 种状态前后切换会对电网造成无功冲击,且受到网侧变流器的容量限制,发出的无功功率主要用于异步发电机建立磁场,对电网的无功支撑能力较差。直驱和半直驱风机主要通过稳定直流电压实现低电压穿越。然而,在低电压穿越前、后,网侧变流器处于直流电压控制和限流控制,2 种状态前后切换会对直流电压造成冲击,且在电网电压跌落时,网侧变流器处于限流状态,无法对电网提供动态的无功支持。文献^[68]考虑了 Crowbar 保护电路和无功补偿装置的协调控制,提出双模式切换的改进 Crowbar 结构,并提出了基于无功补偿装置的,结合风机无功调节能力与改进 Crowbar 的协调控制策略,提升了双馈风机的低电压穿越能力。

在风机控制策略方面,一种是考虑有功和无功的协调控制策略,通过调节桨距角降低有功出力,从而增加风电场无功功率的调节能力,其中各机组无功输出按其有功输出占比来分摊^[69-71]。文献^[72]针对风速大幅度波动引起的电压越限问题,研究了风速波动下风电机组的可控无功能力,提出了风电

场有功和无功多时间尺度协同控制的理论方法。文献[73]提出了通过调节风机的无功、转速和桨距角,协调风电场的有功功率输出和无功功率能力。结果表明,利用有功和无功协调控制的策略能够使风电机组的低电压穿越能力得到显著提升,实现对电网电压的主动支撑。另一种风机控制方式是改变机侧与网侧变流器的控制模式,通过机侧变流器控制直流母线电压,通过网侧变流器实现最大风功率跟踪,提升风电场低电压穿越能力^[74-75]。

针对风机高电压穿越问题,同样包括增加额外硬件电路和通过风机控制策略进行控制2种解决方法。文献[76-80]利用风电机组、Crowbar保护电路、卸荷电路以及SVG,大大提升了风机的高电压穿越能力。

在风机控制策略方面,主要针对电网电压对称骤升、电网电压不对称骤升和不同的骤升幅度进行研究^[81-83]。文献[84]提出了基于预测电流的高电压穿越控制策略,消除了负序电流对风机功率和直流母线电压的影响。文献[85-86]主要通过自适应调整网侧变流器电压进行无功控制,提升双馈风机的高电压穿越能力。

综上所述,针对风机低电压穿越和高电压穿越的暂态电压控制问题,主要通过增加额外硬件电路和风机控制策略2种方法来解决。额外硬件电路主要包括Crowbar保护电路、直流卸荷电路、无功补偿装置、故障电流限制器等;风机控制应协调有功和无功控制,可以采用降低有功输出扩大风机无功调节范围,结合机组内部变流器的电压电流控制,实现对高低电压穿越故障状态下的暂态控制。

4 风电场无功与电压控制研究展望

目前,风电场无功与电压控制技术得到了广泛研究,但在实际风电场的应用并不多。当前许多风电场仍然仅投入无功补偿装置进行并网点电压的控制,没有充分利用风电机组的无功调节能力。一些无功与电压控制系统仅对风电机组进行等裕度分配,对于风机和无功补偿装置的无功分配没有进行精细化控制。当前许多风电场无功与电压控制技术的研究也仅仅停留在模型仿真阶段,并没有进行实际风电场的应用试验。针对风电场无功与电压控制技术,未来可以从以下几个方面进行深入研究:

1) 针对稳态运行、高/低电压穿越、大/小风况、无功/电压控制模式,需要研究在不同工况下采取特

定的控制策略。不同工况下的风机和无功补偿装置的运行状态是不同的,往往要根据运行工况需求,按照不同优先顺序调用无功电源。例如,有的风电场要求在电压控制模式下优先调用无功补偿装置,根据其快速响应特点支撑电压调节;而在无功控制模式下,可以优先调用风电机组的无功调节能力。因此,必须采取多种控制策略才能应对实际风电场面临的复杂多工况情景;

2) 风机的无功调节能力需要在实际应用过程中进一步验证。当前的技术研究大都是在风机的理论无功限值基础上进行仿真验证,但一般情况下,风机的功率因数仍然会限制在 $-0.95\sim 0.95$ 内,允许的无功功率大约是有功功率的 $1/3$ 。实际上对于风电机组而言,风机甚至具备在“零有功”工况下的无功调节能力。但目前国内标准对此没有明确要求。因此,需要在实际风电场进一步实验风电机组理论无功调节范围的运行控制;

3) 许多风电场包括定速异步机组、双馈异步机组、永磁直驱机组、半直驱机组等多种机型,应根据不同风机的特性,研究混合风电场的无功与电压控制策略^[87]。随着大型综合能源基地的建设,应结合光伏电站和储能电站的特性,研究风光储等综合能源基地的无功与电压控制策略,实现协调统一的综合能源管理和智能优化控制^[88];

4) 风电场无功与电压控制系统不能成为单一的控制策略,应该与AGC、能量管理平台等有功控制系统进行协调控制。风电场无功与电压控制系统作为AVC子站,应该与相关的有功控制策略进行统一协调管理,结合场站功率预测、电力市场交易等系统,在满足电网调度需求的基础上,保证风电场安全稳定经济运行;

5) 风电场无功与电压控制算法在求解精确和保证电压稳定的前提下,对于求解速度也要求更高。随着风电场大规模地发展和建设,包括分散式风电场的建设和并网,集中式的控制策略越来越难以满足计算速度的需求。风电场无功与电压控制技术应该向分层分区、分散式、分布式控制方向发展,将大型优化控制问题分解为若干个子问题,以迭代方式进行求解,从风电场群、风电场站、风机分区、风电机组进行多层级控制^[89-93];

6) 随着人工智能技术的迅猛发展,特别是深度学习和强化学习的结合,如深度确定性策略梯度等算法,给优化问题带来了新的求解方法。深度强化

学习已经在风电消纳、风电场营收管理、风电预测、风电场优化调度与控制等方面取得了突破性进展,基于深度强化学习的风电场无功与电压控制技术也逐渐趋于成熟^[94]。深度强化学习能通过训练神经网络将复杂的优化过程转化为神经元计算,前向计算时不需要耗时求导与迭代,仅需要数毫秒即可完成求解计算;

7)随着海上风电场规模化建设,其无功与电压控制技术也越来越重要^[95-96]。相较于陆上风电系统,海上风电系统需要更长的海底电缆连接,风机间距离更大,风电场的潮流模型也更复杂。海底电缆存在的对地电容效应会产生大量充电功率,容易引发过电压与振荡问题。同时,海上风电并网系统包含风电机组、多样化无功补偿设备、VSC换流器等多种无功源,多类型无功设备协调优化控制更加困难。需要研究适用于海上风电场的无功与电压控制技术,才能保证海上风电场安全稳定运行。

5 结 语

随着风电场大型化、规模化建设,风电场电压波动问题已经成为我国风电行业面临的主要问题之一。风电场电压主要受到无功功率的影响,电压波动对风电机组的运行状态和使用寿命产生恶劣的影响,甚至造成大面积脱网事故。因此,风电场无功与电压的控制效果直接影响风电场的安全稳定经济运行。本文结合实际多年的风电行业运维经验,聚焦风电场无功与电压控制策略问题,分析了当前风电场面临的无功与电压控制问题,重点探讨了风电机组和无功补偿装置的特性、无功与电压稳态控制、内部节点电压控制、模型预测控制、故障状态下暂态电压控制技术5个方面,总结分析了当前风电场无功与电压控制研究方法和进展情况,并对未来风电场无功与电压控制技术的研究和应用方向提供了建议,为有效控制风电场安全稳定运行提供了重要的理论基础和技术方案,有助于风电场起到主动支撑电网调度运行的关键作用,为我国更好更快实现“双碳”目标贡献技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] 王俊杰. 大规模风电无功分配策略研究综述[J]. 电工技术, 2020(2): 71-73.
WANG Junjie. Research review of reactive power distribution strategy for large-scale wind power[J]. Electric Engineering, 2020(2): 71-73.
- [2] 刘会. 风电场无功功率分配优化策略研究[D]. 西安:

西安理工大学, 2021: 1.

LIU Hui. Research on optimization strategy of reactive power distribution in wind farm[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 1.

- [3] 崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300-4307.
CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.
- [4] ZHU X R, WANG Y, FU C. Strategy of reactive power and voltage control in large wind farms integrated region[C]. 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, China, 2010.
- [5] 邵龙, 苏皓轩, 王慧敏. 大规模风电并网时双馈风机无功出力研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(9): 18-23.
SHAO Long, SU haoxuan, WANG Huimin. Research of reactive power output of doubly-fed induction generator when large-scale wind power integration[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013, 29(9): 18-23.
- [6] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [7] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [8] SAENZ J R, TAPIA A, TAPIA G, et al. Reactive power control of a wind farm through different control algorithms[C]. IEEE International Conference on Power Electronics & Drive Systems, 2001.
- [9] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 389-396.
- [10] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2), 488-498.
- [11] HAN T W, HUANG H Y, SHI L J, et al. Reactive power coordinated control strategy for offshore wind farm cluster with VSC-HVDC transmission[C]. 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2019.
- [12] PEREIRA R, FERREIRA C, BARBOSA F. Comparative study of STATCOM and SVC performance on dynamic voltage collapse of an electric power system with wind generation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(2): 138-145.
- [13] WANG K K, GAO S F, SHI Z P, et al. Research on reactive power coordinated control strategy of doubly-fed wind farm considering STATCOM[C]. IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020.
- [14] 崔杨, 徐蒙福, 唐耀华, 等. 基于集电系统无功灵敏度的双馈风电场无功控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2418-2423.
CUI Yang, XU Mengfu, TANG Yaohua, et al. Reactive control strategy of DFIG wind farm based on reactive

- sensitivity of collection system[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2418-2423.
- [15] 蔡游明, 李征, 蔡旭. 以并网点电压和机端电压平稳性为目标的风电场无功电压协调控制[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(8): 166-173.
CAI Youming, LI Zheng, CAI Xu. Coordinated control of reactive power and voltage for wind farm aiming at voltage stability of PCC and generator terminal[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(8): 166-173.
- [16] 杨博, 刘炳强, 蒋晓涵, 等. 大规模风电场并网暂态保护技术综述[J]. *热力发电*, 2023, 52(3): 13-25.
YANG Bo, LIU Bingqiang, JIANG Xiaohan, et al. A survey of transient protection technologies of large-scale wind farm integration[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(3): 13-25.
- [17] 周昌平, 汪震, 甘德强, 等. 双馈风机并网系统高电压穿越控制策略稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(20): 7415-7426.
ZHOU Changping, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Stability analysis of high voltage ride through control strategy for DFIG integrated system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(20): 7415-7426.
- [18] SHABESTARY M M, MORTAZAVIAN S, MOHAMED Y I. Overview of voltage support strategies in grid-connected VSCs under unbalanced grid faults considering LVRT and HVRT requirements[C]. 2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). Oshawa, ON, Canada, 12-15 August 2018.
- [19] 朱永利, 艾斯卡尔, 刘少宇, 等. 风力发电机组高电压穿越问题及其基本解决方案[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(5): 6-11.
ZHU Yongli, AISIKAER, LIU Shaoyu, et al. Issues and preliminary solutions on wind turbines high voltage ride through[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2014, 41(5): 6-11.
- [20] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈电机风电场等裕度无功分配策略[J]. *中国电力*, 2011, 44(8): 57-61.
LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Reactive power distribution in equivalent margin of a wind farm with doubly fed induction generators[J]. *Electric Power*, 2011, 44(8): 57-61.
- [21] 李桂丹, 王佳琦, 靳新悦, 等. 风电场内部无功分配优化策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(7): 123-128.
LI Guidan, WANG Jiaqi, JIN Xinyue, et al. Optimization strategy of reactive power dispatch in wind farm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(7): 123-128.
- [22] ZHANG B H, HU W H, HOU P, et al. Review of reactive power dispatch strategies for loss minimization in a DFIG-based wind farm[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 856.
- [23] 朱建华, 何卓林, 闫伟军, 等. 风电场自动电压控制中风机和静止无功发生器的无功分配研究[J]. *电气技术*, 2022, 23(4): 31-36.
ZHU Jianhua, HE Zhuolin, YAN Weijun, et al. Research on reactive power distribution of wind turbine and static var generator in automatic voltage control of wind farm[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(4): 31-36.
- [24] 刁书广, 魏颖超, 彭冬宇, 等. 风电场 AVC 自动电压无功控制概述[J]. *风能*, 2016(5): 56-61.
DIAO Shuguang, WEI Yingchao, PENG Dongyu, et al. Overview of AVC automatic voltage and reactive power control in wind farm[J]. *Wind Energy*, 2016(5): 56-61.
- [25] XU H C, DAI Z M, WANG Y, et al. Reactive power control strategy of multi-reactive power source cooperative wind farm and grid[C]. 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Nanjing, China, 2021.
- [26] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2714-2720.
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [27] 高阳. 电网故障时双馈风力发电机无功电流分配及控制策略[J]. *电力科学与工程*, 2017, 33(12): 28-33.
GAO Yang. Reactive current distribution and control strategy of doubly-fed induction generator in grid fault[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2017, 33(12): 28-33.
- [28] 张文, 阙波, 韦古强, 等. 双馈型风电场双层无功分配策略[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(1): 79-83.
ZHANG Wen, QUE Bo, WEI Guqiang, et al. Hierarchical distribution strategy of reactive power for DFIG wind farm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(1): 79-83.
- [29] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(30): 87-92.
JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(30): 87-92.
- [30] 李丽霞, 姚兴佳, 王晓东, 等. 双馈风电场新型无功优化分配策略研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(5): 1397-1404.
LI Lixia, YAO Xingjia, WANG Xiaodong, et al. An optimal reactive power dispatch strategy for interior-point method based wind farms[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(5): 1397-1404.
- [31] 李生虎, 章怡帆, 于新钰, 等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 1-7.
LI Shenghu, ZHANG Yifan, YU Xinyue, et al. Research on balanced reactive power distribution of wind farms with improved droop control and double-layer reactive power optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 1-7.
- [32] LI S H, ZHANG Y F, YU X Y, et al. Reactive power dispatch of DFIGs in wind farm based on multi-object optimization[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2019, 30(3): 1-16.
- [33] 严干贵, 孙兆键, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(18): 140-146.
YAN Gangui, SUN Zhaojian, MU Gang, et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(18): 140-146.
- [34] 王渝红, 廖逸霖, 宋雨妍, 等. 风电场内部分散式无功电压优化控制策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 5047-5056.
WANG Yuhong, LIAO Yiben, SONG Yuyan, et al. Distributed optimal control strategy of reactive power and voltage in wind farm[J]. *High Voltage Engineering*, 2022,

- 48(12): 5047-5056.
- [35] 陈逸琿, 林令淇, 田鑫. 三级式风电 AVC 协调控制策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(4): 20-27.
CHEN Yihui, LIN Lingqi, TIAN Xin. Three-level wind power AVC coordinated control strategy[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(4): 20-27.
- [36] 陈惠粉, 张毅威, 闵勇, 等. 集群双馈风电场的分次调压控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 7-13.
CHEN Huifen, ZHANG Yiwei, MIN Yong, et al. Graded voltage control strategy for clustering wind farms based on doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 7-13.
- [37] MEHRJERDI H, LEFEBVRE S, SAAD M, et al. A decentralized control of partitioned power networks for voltage regulation and prevention against disturbance propagation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1461-1469.
- [38] NOWAK S, WANG Liwei, METCALFE M S. Two-level centralized and local voltage control in distribution systems mitigating effects of highly intermittent renewable generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105858.
- [39] DING T, BO R, SUN H B, et al. A robust two-level coordinated static voltage security region for centrally integrated wind farms[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 460-470.
- [40] NGUYEN T, KIM A H. Leader-following diffusion-based reactive power coordination and voltage control of offshore wind farm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 149555-149568.
- [41] AHMIDI A, GUILLAUD X, BESANGER Y, et al. A multilevel approach for optimal participating of wind farms at reactive power balancing in transmission power system[J]. IEEE System Journal, 2012, 6(2): 260-269.
- [42] 栗树材. 并网风电场无功控制与电压稳定研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2014: 1.
LI Shucai. Research on reactive power control and voltage stability of grid connected wind farm[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2014: 1.
- [43] LIU H, ZHE C. Aggregated modelling for wind farms for power system transient stability studies[C]//Proceedings of the 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, (APPEEC). 2012: 15.
- [44] 陈树勇, 王聪, 申洪, 等. 基于聚类算法的风电场动态等值[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 11-19.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19.
- [45] 吴红斌, 何叶, 赵波, 等. 基于改进 K-means 聚类算法的风电场动态等值[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3232-3238.
WU Hongbin, HE Ye, ZHAO Bo, et al. Research on dynamic equivalent of wind farm based on improved K-means clustering algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3232-3238.
- [46] 王磊, 盖春阳, 王恒. 基于改进 D-K 聚类算法的直驱型风电场动态等值建模[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 48-55.
WANG Lei, GAI Chunyang, WANG Heng. Dynamic equivalence method of PMSG wind farms based on improved D-K clustering algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 48-55.
- [47] 吴琴, 钟庆, 王钢, 等. 基于模糊 C 均值聚类的风电场多机等值方法[J]. 现代电力, 2016, 33(6): 27-32.
WU Qin, ZHONG Qing, WANG Gang, et al. Multi-machine equivalent approach of wind farm based on fuzzy C-means clustering[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(6): 27-32.
- [48] 但扬清, 王康, 徐鹏, 等. 基于改进无功源空间的含风电场电网无功电压分区方法[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(3): 49-52.
DAN Yangqing, WANG Kang, XU Peng, et al. Partitioning of power system with wind farm based on improved var source-space[J]. Electric Power Technology and Environmental, 2016, 32(3): 49-52.
- [49] 杜晓岩, 尹华杰, 叶超. 基于改进模糊 C 均值聚类和 MPSO 的风电场等值研究[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 38-44.
DU Xiaoyan, YIN Huajie, YE Chao. Equivalent model of wind power farm based on improved fuzzy C means clustering and MPSO[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 38-44.
- [50] 李茜, 毛雅铃, 王武双, 等. 基于动态机组分类的风电场优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 419-424.
LI Qian, MAO Yaling, WANG Wushuang, et al. Optimal scheduling of wind farms based on dynamic wind turbine clustering[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(6): 419-424.
- [51] 李牡丹, 王印松. 基于 ASW-FCM 算法的风电场动态等效建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(8): 1606-1616.
LI Mudan, WANG Yinsong. Dynamic equivalent modeling and simulation of wind farm based on ASW-FCM algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1606-1616.
- [52] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 1): 203-213.
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(Suppl.1): 203-213.
- [53] ZHAO H R, WU Q W, GUO Q L, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1440-1451.
- [54] 杜剑行, 朱冬雪. 基于模型预测控制的风电场多层次无功电压优化[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(9): 44-50.
DU Jianxing, ZHU Dongxue. Multi-level reactive power and voltage optimization strategy of wind farm based on model predictive control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(9): 44-50.
- [55] TANG Z Y, HILL D J, LIU T, et al. Hierarchical voltage control of weak subtransmission networks with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 187-197.
- [56] ZHAO H R, WU Q W, WANG J H, et al. Combined active and reactive power control of wind farms based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1177-1187.
- [57] 鲍金雨. 基于模型预测控制的风电场无功电压协调控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 1.
BAO Jinyu. Coordination control of reactive power and voltage of a wind farm based on model predictive control[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 1.

- [58] ZHAO H R, WU Q W, GUO Q L, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1440-1451.
- [59] 张靖, 李博文, 余珮嘉, 等. 基于状态空间的双馈风力发电机模型预测控制[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2904-2909.
ZHANG Jing, LI Bowen, YU Peijia, et al. Model prediction control based on state space for doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2904-2909.
- [60] GUO Y F, GAO H L, WU Q W, et al. Distributed coordinated active and reactive power control of wind farms based on model predictive control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 104(1): 78-88.
- [61] 宋亚维. 基于MPC的DFIG风电场协调功率控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 1.
SONG Yawei. Research on MPC-based coordinated power control scheme for DFIG-based wind farm[D]. Changsha: Hunan University, 2020: 1.
- [62] 张哲, 王成福, 董晓明, 等. 基于分层模型预测控制的风电场电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 34-42.
ZHANG Zhe, WANG Chengfu, DONG Xiaoming, et al. Coordinated voltage control strategy of wind farms based on hierarchical model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 34-42.
- [63] 宋子秋, 冯翰宇, 余照国, 等. 基于模型预测控制的半潜漂浮式风机协调控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4330-4339.
SONG Ziqiu, FENG Hanyu, YU Zhaoguo, et al. Coordinated control of semi-submersible floating turbine with model predictive control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4330-4339.
- [64] 宋成宝, 杨啸天, 刘兴华, 等. Crowbar 电路对双馈风力发电机暂态过程的影响分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2017, 48(3): 423-428.
SONG Chengbao, YANG Xiaotian, LIU Xinghua, et al. The influence of Crowbar circuit on transient process of doubly fed wind generator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 48(3): 423-428.
- [65] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.
ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LYU Xiao, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [66] 瞿鹏, 周孝信, 安宁, 等. 提高双馈式风力发电机机电暂态模型 Crowbar 保护仿真精度的方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1322-1328.
ZI Peng, ZHOU Xiaoxin, AN Ning, et al. A method of improving the accuracy of DFIG electromechanical transient model considering Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1322-1328.
- [67] 徐明辉, 李泽滔, 陶金. 基于 Crowbar 保护的双馈风力发电机低电压穿越研究[J]. 电气技术, 2014(6): 48-51.
XU Minghui, LI Zetao, TAO Jin. Crowbar protection circuit based doubly-fed wind turbine low voltage ride through research[J]. Electrical Engineering, 2014(6): 48-51.
- [68] 李雨龙, 袁旭峰, 陈瑞洁, 等. 计及无功补偿的双馈风机低电压穿越技术[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 100-107.
LI Yulong, YUAN Xufeng, CHEN Ruijie, et al. Low voltage ride through technology of DFIG considering reactive power compensation[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 100-107.
- [69] 高峰, 周孝信, 赵东来, 等. 直驱式风电场功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 33-38.
GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHAO Donglai, et al. Coordinated control of reactive and active power for direct-drive wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 33-38.
- [70] 荣飞, 李培瑶, 周诗嘉. 双馈风电场损耗最小化的有功无功协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 520-529.
RONG Fei, LI Peiyao, ZHOU Shijia. Coordinated optimal control with loss minimization for active and reactive power of doubly fed induction generator-based wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 520-529.
- [71] 徐海亮, 李志, 王中行. 低电压穿越期间双馈风电机组稳定性分析与电流分配方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 198-205.
XU Hailiang, LI Zhi, WANG Zhongxing. Stability analysis and current distribution method of DFIG during low voltage ride-through[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 198-205.
- [72] OUYANG J X, LI M Y, ZHANG Z, et al. Wind integrated power system for severe wind speed fluctuation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 51201-51210.
- [73] OUYANG J X, TANG T, YAO J, et al. Active voltage control for DFIG-based wind farm integrated power system by coordinating active and reactive powers under wind speed variations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1504-1511.
- [74] KIM K, JEUNG Y, LEE D, et al. LVRT Scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376-2384.
- [75] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.
FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Review of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85.
- [76] HUANG H, WU X I, HUO C, et al. Research on emergency control strategy of synchronous condenser for inhibiting wind turbine tripping in sending-end network[C]. International Conference on Power System Technology, Guangzhou, China, 2018.
- [77] 吕清洁, 徐政, 李晖, 等. 动态无功补偿对风电场暂态电压的影响及控制策略[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 122-129.
LYU Qingjie, XU Zheng, LI Hui, et al. Effects of dynamic reactive power compensation on wind farm transient voltage and its control strategy research[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 122-129.
- [78] ZHANG Y d, LI Q, ZHANG J P, et al. Wind farm HVRT capability improvement based on coordinated reactive power control strategy[J]. Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 756-761.
- [79] 詹锦. 双馈风力发电机组的故障电压穿越协调控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 1.
ZHAN Jin. Coordinated control of voltage fault ride through of doubly-fed induction generator[D]. Wuhan:

- Huazhong University of Science and Technology, 2021: 1.
- [80] 侯文昭. 基于双馈风力发电机的风电系统高电压脱网问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 1.
HOU Wenzhao. Study of high voltage off-grid problem of wind power system based DFIG[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 1.
- [81] 谢震, 张兴, 宋海华, 等. 电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 39-46.
XIE Zhen, ZHANG Xing, SONG Haihua, et al. Variable damping based control strategy of doubly fed induction generator based wind turbines under grid voltage swell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 39-46.
- [82] 周斌龙, 赵巧娥, 郭敏, 等. 电网电压对称骤升下DFIG的HVRT协调控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(2): 108-111.
ZHOU Binlong, ZHAO Qiaoe, GUO Min, et al. Coordinated control strategy for HVRT of DFIG under symmetrical sudden rise of grid voltage[J]. Power Electronics, 2019, 53(2): 108-111.
- [83] 谢震, 张兴, 杨淑英, 等. 电网电压不对称骤升下双馈风力发电机改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 109-118.
XIE Zhen, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. An improved control strategy for doubly fed induction wind generators under unbalanced grid voltage swell[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 109-118.
- [84] FELTES C, ENGELHARDT S, KRETSCHMANN J, et al. High voltage ride-through of DFIG-based wind turbines[C]. Power & Energy Society General Meeting-conversion & Delivery of Electrical Energy in the Century, 2008.
- [85] ZHONG Z, GENG Y, HUA G. High voltage ride-through control strategy of grid-side converter for DFIG-based WECS[C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013 39th Annual Conference of the IEEE, 2013.
- [86] 张谦, 蒋永梅, 丁敏, 等. 双馈风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. 浙江电力, 2019, 38(2): 57-61.
ZHANG Qian, JIANG Yongmei, DING Min, et al. A coordinated control strategy for high voltage ride-through of doubly-fed induction generator[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(2): 57-61.
- [87] ZENG X, YAO J, CHEN Z Q, et al. Co-ordinated control strategy for hybrid wind farms with PMSG and FSIG under unbalanced grid voltage condition[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1100-1110.
- [88] 黄琴. 基于深度强化学习的风光储系统运行和控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022: 1.
HUANG Qin. Research on operation and control method of wind and solar energy storage system based on deep reinforcement learning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022: 1.
- [89] HUANG S, WU Q, GUO Y, et al. Distributed voltage control based on ADMM for large-scale wind farm cluster connected to VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 584-594.
- [90] 李浩志. 基于多智能体的风电场无功电压控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
LI Haozhi. Research on reactive power and voltage control technology of wind farm based on multi-agent[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [91] 董密, 李力, 粟梅, 等. 微电网经济运行的分布式二次电压-频率恢复控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 461-472.
DONG Mi, LI Li, SU Mei, et al. Distributed secondary voltage-frequency recovery control algorithm for economic operation of microgrid[J]. Control Theory & Application, 2019, 36(3): 461-472.
- [92] 董密, 张心露, 杨建, 等. 孤岛模式下多源直流微电网经济运行的协调优化控制策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 51-58.
DONG Mi, ZHANG Xinlu, YANG Jian, et al. Coordinated optimization control strategy for economic operation of multi-source DC microgrid in island mode[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2019, 38(5): 51-58.
- [93] 刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1555-1561.
LIU Jizhen, WANG Wei, HU Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(12): 1555-1561.
- [94] YOUSEFIAN R, BHATTARAI R, KAMALASADAN S. Transient stability enhancement of power grid with integrated wide area control of wind farms and synchronous generators[J]. IEEE Transactions of Power Systems, 2017, 32(6): 4818-4831.
- [95] 房方, 梁栋焱, 刘亚娟, 等. 海上风电智能控制与运维关键技术[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 175-185.
FANG Fang, LIANG Dongyang, LIU Yajuan, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 175-185.
- [96] NGUYEN T, KIM A H. Cluster-based predictive PCC voltage control of large-scale offshore wind farm[J]. IEEE Power & Energy Society Section, 2021, 9: 4630-4641.

(责任编辑 李园)