

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209103

大规模风电场并网暂态保护技术综述

杨 博¹, 刘炳强¹, 蒋晓涵^{1,2}, 束洪春^{1,2}

(1.昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;
2.昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650500)

[摘 要] 大规模风电场并网会出现频率偏移、弱馈性和高谐波等暂态稳定问题, 对系统的安全运行造成影响。因此, 很有必要研究大规模风电场并网暂态保护技术。对大规模风电场的并网技术和暂态保护技术进行了全面评述, 分析了每种并网技术的拓扑结构, 对比了基于双馈异步风力发电机、直驱永磁同步发电机、传统同步电源系统 3 种发电系统的故障特性, 同时阐述了陆上风电场和海上风电场暂态量保护的研究现状, 最后对未来大规模风电场的暂态保护的发展提出了展望, 可为未来风电场并网的研究提供参考。

[关 键 词] 大规模风电场; 并网技术; 送出线路; 暂态量保护; 暂态特征

[引用本文格式] 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.

A survey of transient protection technologies of large-scale wind farm integration

YANG Bo¹, LIU Bingqiang¹, JIANG Xiaohan^{1,2}, SHU Hongchun^{1,2}

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The integration of large-scale wind farms will lead to transient stability problems, such as frequency offset, weak feedback and high harmonics, and affect the safe operation of the system. Therefore, research of transient protection technology for large-scale wind farm integration is an urgent requirement. A comprehensive review about grid connection technology and the transient protection technology for large-scale wind farms is carried out. The topology structure of each integration technology is carefully analyzed. Besides, the fault characteristics of three power systems, including permanent magnet synchronous generator, doubly fed induction generator, and traditional synchronous power system are compared and the current research status of transient based protection of onshore and offshore wind farms is illustrated. Finally, perspectives are outlined for future development of relay protection technology in large-scale wind farms, which provides a significant reference for the research of future wind farm integration.

Key words: large-scale wind farm; integration technology; transmission lines; transient protection; transient characteristics

当前, 环境污染和化石燃料能源不足的问题日益严重, 在缓解环境退化和优化能源结构的推动下, 太阳能、风能等可再生能源受到世界各国的广泛关注。随着新能源发电技术的不断推进, 风力发电以其分布广泛和技术成熟等优势在全球新能源

中具有重要地位, 无论在我国还是世界范围内均发展迅速^[1-3]。

大型风力发电机组主要采用双馈异步风力发电机和直驱永磁同步风力发电机 2 种机型进行发电, 这 2 种风机虽在性能上各不相同, 但在发电量

修回日期: 2022-09-09 网络首发日期: 2022-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61963020); 云南省重大科技专项计划(202002AF080001)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61963020); Major Special Project of Yunnan Province of China (202002AF080001)

第一作者简介: 杨博(1988), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源与储能系统智能优化与控制、人工智能在智能电网中的应用,
yangbo_ac@outlook.com。

通信作者简介: 蒋晓涵(1994), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、新能源并网技术等, jxhkunming@163.com。

和经济性上相差并不大^[4-6]。大规模风电场主要采用集中接入方式并网，并网问题一直是风电发展的主要挑战。目前，为实现大规模风电场并网，国内外研究人员提出了3种并网技术方案，即：高压交流(high voltage alternating current, HVAC)技术、高压直流(high voltage direct current, HVDC)技术和低频交流(low-frequency alternating current, LFAC)技术(分频交流技术)^[7-8]。大规模风电场并网后由于其随机性、间歇性、波动性等特点，会对系统的安全运行造成影响，其中对继电保护的影响最为显著^[9]。

大规模风电场并网后的故障特性相比于传统电网存在较多差异，会出现频率偏移、弱馈性和高谐波等现象^[10-12]，使得暂态过程中电力系统的电压、频率和电流等运行参数不再像稳态运行时那样保持常数而是随时间大幅度变化，导致传统工频量保护在大规模风电场并网系统中存在误动或灵敏性下降等问题^[13-14]，为故障穿越技术带来了新的挑战。对于传统工频量保护在大规模风电场并网后的适用性，相关研究进行了分析，作为输电线路主保护的纵联差动保护、距离保护和方向纵联保护，所采集的数据一般为工频电压和电流，而基于傅氏算法的工频量相量提取不再准确^[15-16]，文献^[17]通过理论分析与仿真验证后表明，基于工频变化量距离保护和正序故障分量方向元件的保护不再适用于大规模风电场送出线路。

传统工频量保护原理在电力系统继电保护领域发挥着重要作用，然而，现代电网呈现一些新情况，如大量新能源接入电网、直流输电和交直流混合输电应用等，存在调节和控制的动态(响应)过程，对基于工频量的保护原理提出新的挑战 and 更高的要求。随着计算机技术、现代信号处理和数字信号处理(digital signal processing, DSP)技术的发展，基于故障暂态的电力系统继电保护思想出现，开启了对暂态保护原理系统研究的新纪元。大规模风电送出线路是高压输电线路，发生故障后若不及时切除，系统长时间带故障运行会引起事故扩大，必须对其快速而可靠地切除，而故障后高频暂态量(电压、频率、电流)包含故障特征信息丰富，基于暂态量的电力系统暂态保护所需时窗较短，速动性要求高。因此，暂态量保护研究是大规模风电场并网后稳定可靠运行的重要一环。

本文首先介绍了大规模风电场并网技术的发展现状，接着分析了基于双馈异步风力发电机组和

直驱永磁同步风力发电机组的风电场故障后的主要暂态特征，并总结了风电场暂态保护技术的研究现状和技术特点；最后对未来大规模风电场并网后系统暂态量保护的发展提出了展望。

1 大规模风电场并网技术现状

风电是占比较高的新能源之一，相比于光伏发电、光热发电、储能技术等，风力发电技术发展相对成熟，其中，并网技术是风能技术的核心问题，也是世界各风电大国面临的共同难题。

1.1 HVAC 技术

HVAC 技术的拓扑结构如图 1 所示。由于风力的间歇性和不确定性，风力发电机组产生的频率信号和电压信号是时变的，变流器可以将这种时变信号转化为恒频、恒压的交流电信号，再进行升压操作，使其经过 HVAC 线路传输至用户侧的变电站，从而完成输电的全过程^[8]。

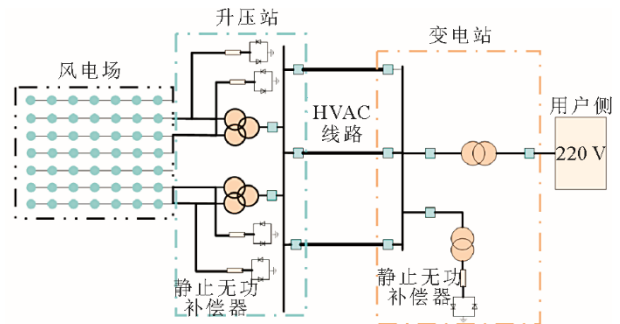


图 1 HVAC 技术结构

Fig.1 Structure of the HVAC integration technology

HVAC 技术是目前发展比较成熟的并网技术，其系统结构比较简单，施工成本相对较低，因此是大多数新能源发电并网技术的首选，但由于需要进行交流电转换，且线路中存在大量无功损耗，容易产生过电压等问题，对电能质量造成严重影响，同时还限制了传输容量、传输距离等。

目前主要采用 2 种方法缓解线路中存在的过电压问题：1) 调整风电场功率参数；2) 安装无功补偿装置，一般补偿量应控制在总数的 70% 左右，并根据实际需要进行调整^[18]。

1.2 HVDC 技术

HVDC 技术可以有效克服 HVAC 无功功率损耗等问题，而且具有输送距离远、控制灵活等特点，适用于输电距离更远的新能源并网。HVDC 主要分为基于晶闸管的线路换流器(line commutated converter,

LCC) 的 HVDC 技术和基于电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 的 HVDC 技术^[19-20], 其结构如图 2 所示。相比于 LCC-HVDC 技术, VSC-HVDC 技术可视为独立电源, 不存在换向失败等问题, 且灵活性较高, 容易构建多端的直流输电系统。

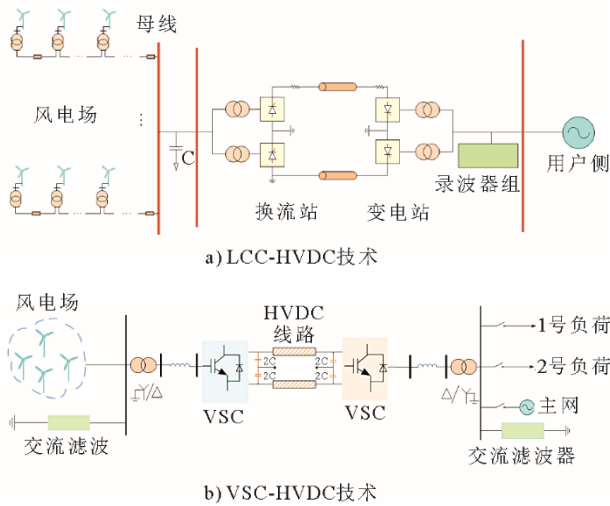


图 2 HVDC 技术结构

Fig.2 Structure of the HVDC integration technology

有学者在二者基础上提出混合型输电 (hybrid-HVDC) 技术和二极管型输电 (diode rectifier, DR-HVDC) 技术^[21-22]。Hybrid-HVDC 技术综合了 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 技术的特点, 可以降低输电线路换向失败的风险并提高整个输电系统的经济性。DR-HVDC 技术可以减少 HVDC 系统的建设成本, 但不能像 VSC-HVDC 那样能够自身提供电压, DR 的启动需要辅助设备, 因此其经济性启动是目前需要解决的一个难题。

此外, 为了进一步降低高压直流输电系统的成本, 有学者提出全直流型输电 (All-DC) 技术^[23], 采用直流汇聚、直流传输的方式来实现电能的传输, 该技术可减少工频变压器和功率转化器的数量, 在成本和电能传输效率上占较大优势。另一方面, 用直流电缆代替交流电缆可以增加传输容量和降低损耗, 同时也可以解决风电场内部无功电压的问题。根据风机的连接方式, 全直流型输电方案可分为串联汇集方案和并联汇集方案^[24], 其结构如图 3 所示。由于还有很多关键技术有待解决, 目前世界上还未建成全直流型的风电场, 但全直流型输电技术对未来大规模海陆风电场并网的发展具有重要意义。

1.3 LFAC 技术

目前国际上常用的输电技术为 HVDC 技术, 但

直流输电换流站投资较高, 对中短距离的工程不够经济。近年来, 为了进一步提高大规模风电场的可靠性和经济性, 提出了一种新的输电技术——LFAC 技术^[25], 其结构如图 4 所示。LFAC 是 HVAC 技术的一种变化, 以工频 (50 Hz) 的 1/3 频率 (50/3 Hz) 运行, 该技术使用低频工作的交流输电线路将功率从大规模风电场传输到陆上背靠背 (back to back, BTB) 变频器, 再将低频转为电网频率。LFAC 技术刚开始被应用于轨道电气系统, 缺少实际的工程技术经验, 目前全球首个低频输电项目——220 kV 中埠-亭山柔性低频输电示范项目已在中国正式投入使用。

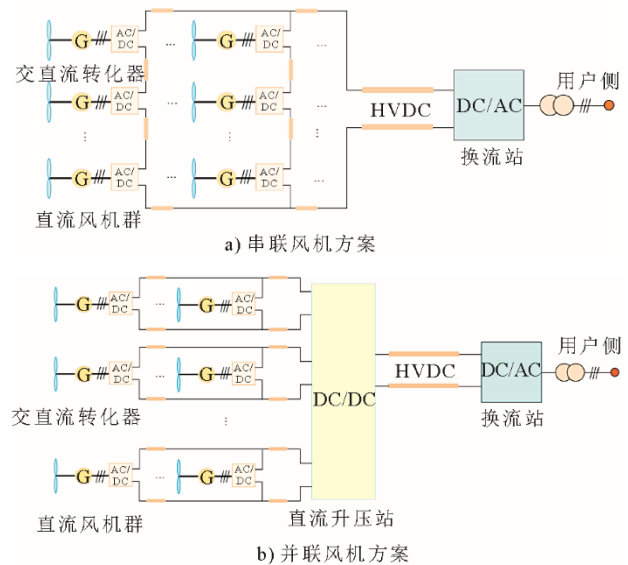


图 3 All-DC 并网技术结构

Fig.3 Structure of the All-DC integration technology

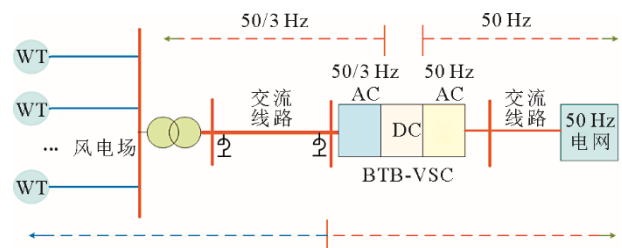


图 4 LFAC 并网技术结构

Fig.4 Structure of LFAC integration technology

与 HVAC 技术相比, LFAC 技术在低频环境下传输容量和传输距离均有所增加。相比于 HVDC 技术, LFAC 技术不需要安装换流器, 能够显著降低施工和运维成本。此外, LFAC 技术能够减少谐波的产生, 保证电能质量。有研究^[25-26]表明, 理论上 LFAC 技术是中远距离的大规模新能源并网的理想方案, 表 1 总结了 3 种并网技术的特点和适用范围。

表 1 大规模风电场并网技术优缺点及适用范围

Tab.1 Advantages, disadvantages and application scope of integration technologies of large-scale wind farms

并网技术	优点	缺点	适用范围
HVAC ^[8,26-27]	可靠性高、技术成熟、结构简单	无自启动能力，无功功率损耗较大	传输距离 60 km 以下，中小型容量风电场
LCC-HVDC ^[19,28]	线路成本和损耗低，系统异步运行能力强，技术成熟	产生大量谐波，存在换向失效问题，换流站占地面积大	陆上风电场 LCC 站的建设，高电平传输
VSC-HVDC ^[20]	具备自启动能力，实现潮流逆变，换流站占地面积小、投资小，无换相失败问题	直流侧故障电流大，直流断路器数量多（昂贵）	大规模新能源并网，传输距离 100 km 以上，多终端输电的并网，超高压电压等级传输
HVDC	Hybrid-HVDC ^[21]	开关损耗低，投资较小	超高压、柔性输电系统，大容量、高直流故障率的风电场
	DR-HVDC ^[22]	减少海上平台建设，传输能力强，传输损耗和成本低	交流电压设置较少，启动困难，缺乏无功功率供应，可控性弱
	All-DC ^[23-24]	减少换流站投资，可靠性高，操作灵活	绝缘困难，电源电压耦合作用强，电压控制困难
LFAC ^[25-26]	投资成本低，运输效率高，系统复杂性低	变压器规模大，技术不成熟、缺乏实践	中等容量风电场，传输距离 80~180 km

2 大规模风电并网系统故障特性分析

风电的间歇性、随机性等特点会导致内部控制系统发生变化从而影响故障特性^[29-30]。目前，在风电场的继电保护研究中，常以风速、输出功率和端电压等运行数据为指标，对各风电机组进行单机等效^[31-33]。目前采用的主要风机可分为双馈异步风力发电机和直驱永磁同步风力发电机^[34]。双馈异步风力发电机组提供的短路电流除基频分量和暂态直流分量外，还含有衰减转速频率分量^[35-36]。其中，当大规模风电场送出线路发生对称性故障时，其暂态短路电流含有明显的非周期分量^[37-39]；当发生不对称故障时，文献^[36]通过推导得到在机端发生单相接地故障后的三相定子的暂态电流分量：

$$\begin{cases} i_{s\alpha}(t) = a_{\alpha 0} e^{-t/\tau_s} + e^{-t/\tau_r} (a_{\alpha 1} \sin \omega_r t + a_{\alpha 2} \cos \omega_r t) + \\ \quad a_{\alpha 3} \sin \omega_1 t + a_{\alpha 4} \cos \omega_1 t \\ i_{s\beta}(t) = a_{\beta 0} e^{-t/\tau_s} + e^{-t/\tau_r} (a_{\beta 1} \sin \omega_r t + a_{\beta 2} \cos \omega_r t) + \\ \quad a_{\beta 3} \sin \omega_1 t + a_{\beta 4} \cos \omega_1 t \end{cases} \quad (1)$$

式中： ω_r 为三相定子中的角频率。经过仿真验证了所得定子电流表达式的准确度，定子 A 相正负序分量为：

$$\begin{cases} i_{sa\omega_r(1)}(t) = e^{-t/\tau_r} [i_{sa\omega_r(1)1}(t) + i_{sa\omega_r(1)2}(t) + i_{sa\omega_r(1)3}(t) + \\ \quad i_{sa\omega_r(1)4}(t) + i_{sa\omega_r(1)5}(t)] \\ i_{sa\omega_r(2)}(t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)的其他参数含义参考文献^[36]。故障后在角频率下的衰减电流分量中没有负序电流，只有正序电流，当撬棒保护（Crowbar 保护）投入后，定子电流中所含成分与传统同步发电机故障电流所

含成分存在一定差异。研究表明^[40]，在故障后较短时间内，双馈异步风力发电机的暂态电势基本保持不变，即双馈异步风力发电机暂态电势在故障后短时间内存在惯性^[41]，受到双馈异步风力发电机控制器调节的作用，故障后的暂态电流中会存在谐波，波形规律较为复杂^[42]。

含逆变型电源与含传统同步发电机的短路电流特性差异较大^[43-45]，当三相故障发生后，其暂态短路电流可表示为：

$$\begin{aligned} i_{\phi}^* &= i_d^* \cos(\omega t + \theta_{\phi}) - i_q^* \sin(\omega t + \theta_{\phi}) + \\ & (i_0 - i_d^*) \frac{e^{-\xi \omega_a t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(\omega t + \theta_{\phi}) + \\ & i_q^* \frac{e^{-\xi \omega_a t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega t + \theta_{\phi}), \quad t \geq t_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中各参数意义参考文献^[43]。故障相电流呈非工频正弦波衰减和叠加特性，且具有波动性^[46-48]。在研究直驱永磁同步风力发电机接入电网后其特性对系统暂态过程的影响时，考虑到直驱永磁同步风力发电机的暂态模型过于复杂，阶数较高^[49]，一般需对其进行简化^[50]，将变流器用受控源代替，在能够较准确地反映风电机组输出特性的基础上降低分析过程中的复杂度。

另外，对于陆上风电或海上风电经柔直换流站的并网系统，风场侧与网侧均为电力电子电源，导致无法提供稳定的基频故障电流，换流器内部的控制特性将决定其故障后的短路特征。此时风电换流器仅提供正序电流，故障电流一般不会超出电力电子换流器的耐流限值，呈现电流源特征。柔直换流

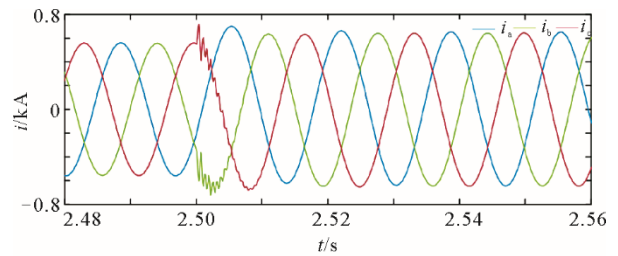
器提供的短路电流如式(4)所示^[44]:

$$i_{\text{mmc}\varphi} = \frac{E_f \cos(\omega t + \theta_\varphi)}{Z_{\text{eq}}} + m \left(\frac{E_f}{Z_{\text{eq}}} + |i_{w\varphi}| \cos(\omega^- t + \theta_{\varphi^-}) \right) \quad (4)$$

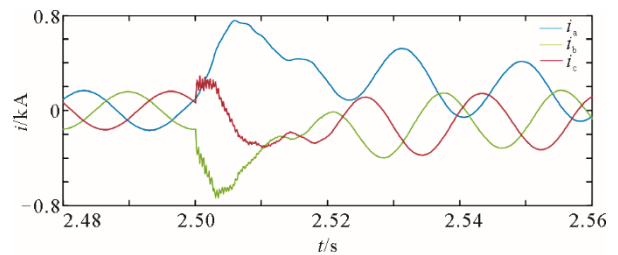
式中： ω 和 ω^- 分别表示正序角频率和负序角频率； $i_{w\varphi}$ 为风场换流器提供的 φ 相故障电流；其他参数参见文献^[44]。从式(4)可以看出，柔直换流器提供的短路电流既包含正序分量也包含负序分量，且在柔直换流器短路电流中含有风电换流器提供的短路电流。因此，为防止其短路电流幅值超过电力电子器件的耐受能力，柔直换流器必须具备快速闭锁能力，故障后柔直换流器呈现电压源特征。

高渗透率风电并网系统的电磁暂态过程更复杂，存在谐波振荡等问题，分析只含有同步发电机的传统电网的电磁暂态过程时，划分故障过程将会面临诸多问题。图5为双电源系统短路电流波形对比。从图5a)可以看出，由于没有控制调节系统，故障后短路电流增大并在故障时间窗内保持不变，而对于图5b)含风电电源的系统，从故障开始，短路电流增大，此时在风电机组控制的作用下，增大的短路电流被抑制，波形呈现受控特性，且含有谐波，风电机组内部变流器装置的控制策略对短路电流特征产生了影响。

表2总结了基于双馈异步风力发电机和基于直驱永磁同步风力发电机的大规模风电场接入电网后的主要暂态故障特性。



a) 两侧均为传统同步发电机系统的短路电流



b) 风电场并网后送出线路的短路电流

图5 短路电流波形对比

Fig.5 Comparison of short-circuit current waveform

风电系统的暂态时间尺度如图6所示^[51]，其中，在暂态过程初期（毫秒级），受电力电子开关动态等影响因素已在图下方标注。

表2 基于不同发电机组的大规模风电场接入电网后的暂态故障特性
Tab.2 Characteristics of integration of wind farm based on various generators

发电机类型	电网类型	故障后暂态特征	影响暂态量保护的因素
同步发电机 ^[43-45]	传统电网	可等效为恒定不变的电压源	故障转换发展以及重合闸等
双馈异步风力发电机 ^[35-36]	新能源并网输电	具有受控特性和短时惯性，含有谐波，波形复杂，不能视为恒定不变的电压源	风电机组的控制调节
直驱永磁同步发电机 ^[46-47]	新能源并网输电	具有受控特性，含有谐波，不能视为恒定不变的电压源	风电机组的控制调节

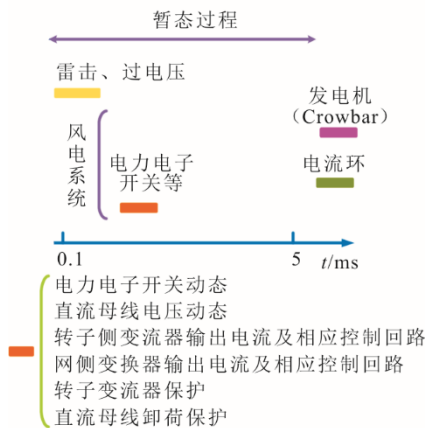


图6 风电系统暂态过程时间尺度

Fig.6 Time scale of transient process for wind power system

3 风电场暂态量保护研究现状

3.1 暂态量保护

采用故障时的高频暂态量所实现的保护称为暂态量保护^[52]，该方法主要通过提取和利用故障引起的暂态电气量含有的故障信息来辨别故障方向、故障相别、故障线路边界等，并结合动作方程和预设时序，及时准确、可靠地切除故障。随着大规模新能源场站和高压交直流互联系统的建设，其高压线路故障后将电网产生较大影响，不利于系统的稳定运行。

1) 基于线路边界滤波特性的暂态量保护^[53]在输电线路的边界处安装限流电抗器可以阻隔故

障高频信号，利用这一特点对区内外故障进行保护。该原理只适用于送出线路边界具有滤波特性的结构，且基于边界特征构成的保护大多都依赖于模型仿真，对于目前大多数风电场来说工作量大、具有局限性并有待检验。

2) 快速距离保护^[54] 可以分为 2 类：①基于工频变化量距离保护的思想，利用高频突变量的距离保护；②时域距离保护，采用暂态电压和暂态电流求解微分方程，不涉及信号的频域信息。2 类距离保护均具有不受系统运行方式影响等优点。

3) 基于双端波形比较的暂态量保护^[55] 根据输电线路两端的暂态电流和电压在区内外故障下波形相似度的差异构成的保护。分析新能源电源并网后的特性可知：当发生区外故障时，线路中流过穿越性电流，两侧的短路电流波形差异很小；发生区内故障时，风电场侧的短路电流呈现非工频特征，频率偏移，而网侧的短路电流波形是以工频为主的正弦波形，从而根据此差异构成保护判据。

4) 基于故障行波的暂态量保护^[56] 利用故障初始行波的极性、幅值等信息构成的保护。基于行波保护的原理适用于受分布电容电流影响较大的线路，一般利用双端电流行波的极性、幅值进行保护判据的构造。

随着全球能源消耗的不断上升和负荷需求的变化^[57]，电力电子设备的非线性和脆弱性等要求继电保护性能向更高速动性的方向发展，暂态量保护的快速性更符合现代电力系统的要求。陆上与海上风电场在风电机组的设计要求上有很大不同，主要受环境与技术水平的影响^[58]。

3.2 陆上风电场暂态量保护

文献[59]借鉴工频变化量距离保护的思想，提出了一种高频突变量距离保护。根据分析，逆变型电源和双馈风机的高频阻抗模型与线路阻抗具有相同的相位特性，因此在高频网络中实现高频突变量距离保护方法，大规模风机等效聚合后的高频阻抗模型和高频故障网络如图 7 所示。该保护方案将高频工作电压与故障点高频电压大小进行比较，其信号采集时窗仅需要故障前后 5 ms，可以可靠地区分区内、外故障，适用于有新能源接入的系统。

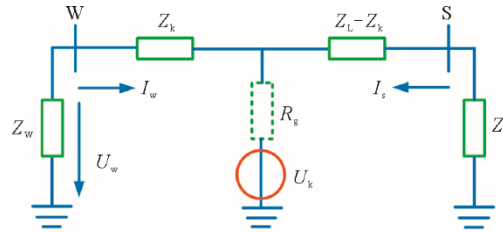
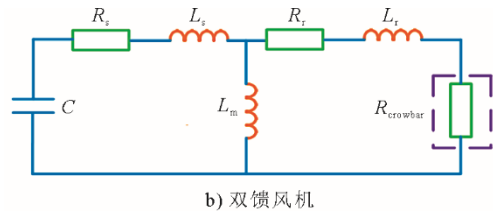
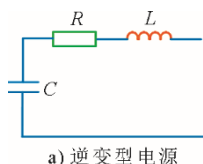


图 7 大规模风电场等效聚合后的高频阻抗结构和高频故障网络
Fig.7 High-frequency impedance structure and high-frequency fault network of large-scale wind farm equivalent aggregation

陆上风电场的系统已经将时域距离保护应用其中，而电气量采用暂态信息的时域距离保护的方案还未进行过检验，但已经有许多相关研究，如：文献[60]采用风电场的暂态电压和暂态电流求解微分方程，不涉及信号的频域信息，可以克服送出线电压、电流主频不同带来的影响，但受高频分量的影响较大；针对此问题，文献[61]提出增加低通滤波及故障点电压重构 2 个环节可以改善算法性能；文献[62]通过利用暂态分量实现基于 $R-L$ 模型的距离保护，并将陷波滤波器应用于其中；文献[63]利用递推最小二乘算法，针对双馈异步风力发电机的风电场送出线路，提出了一种时域距离纵联方向保护；文献[64]基于时域全量故障模型识别的原理，提出了基于阻感模型和电容模型的纵联保护，该方法具有采样率低、时窗较短的特点，适用于集群风电送出线路；文献[40]利用双馈风机暂态等值电势仅存在短时惯性的特征，提出了一种快速距离保护方案，其跳闸逻辑示意如图 8 所示，该方法根据波形的相关性，能够对线路近区故障进行准确识别，且时窗仅为 2 ms，最后通过建立实时数字仿真系统（real time digital simulation system, RTDS）验证了该方法的有效性；文献[65]和文献[66]以时域距离保护原理为基础，分析了基于波形特征构成的保护，同样有效弥补了风电场传统保护的缺陷。

传统交流电网由于其电源为同步发电机，因此故障后的短路电流主要包含工频正弦波和直流分量；而接入新能源电源后，其含有逆变型电源和双馈型电源，故障后的暂态短路电流波形均具有一定

的非工频特性^[67-68]。文献[69]根据新能源场站与系统侧在区内、外故障下波形的特征,提出了利用斯皮尔曼等级相关系数度两侧波形差异的纵联保护方法,该方法不需要较高的采样率,即使在风电场弱出力情况下也可以可靠动作;依据该原理的保护方法还有基于暂态电流波形相关性的保护^[70-71]、基于结构相似度与平方误差的纵联保护^[72]和基于余弦相似度的纵联保护^[43,73]。其中,对于余弦相似度的保护原理,由于余弦相似度不受幅值影响,因此能够准确地反应线路两侧电流波形的差异,可以正确识别区内、外故障。文献[74]通过仿真分析了暂态波形相关性和送出线纵联保护在不同工况和T接等情况下的适应性,验证了其保护方法不受频率偏移的影响且具有一定的抗饱和能力。

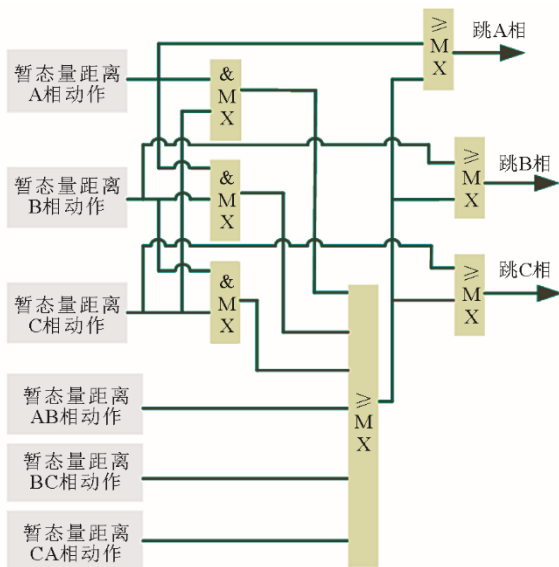


图8 文献[40]快速距离保护方案跳闸逻辑示意
Fig.8 Schematic diagram of tripping strategy of rapid distance protection scheme in reference [40]

对于利用故障行波特征的保护,文献[75]提出了一种基于电流幅值比的纵联保护方法,该方法针对逆变型电源并网后的送出线路,可有效解决传统比率制动式差动保护拒动的问题,计算复杂度小,且适应于风电场弱出力情况。文献[76]基于最小二乘拟合算法,构造三角函数对差动电流波形进行拟合,快速有效地提取波形的主频,从而对线路进行保护,且采样率较低(5 kHz),时窗5 ms,减少了风机控制的影响。

目前,对于陆上风电场送出线路的暂态量保护研究大多集中于时域距离保护和基于双端波形比较的保护,其特点是工作原理清晰,利用时域信息,

不涉及频域,需要时窗较短,可以很好地规避传统工频量保护的缺陷和大量电力电子设备面临的控制问题。另外,所需采样率一般较低且工程量不大,理论上可以实现实际现场的应用,但其可靠性仍然有待检验。

3.3 海上风电场暂态量保护

海上风电场升压站等设备大多为无人值班,此时电气设备所配备的继电保护应快速可靠地切除故障,以防扩大故障范围造成更严重的影响^[77-80]。

3.3.1 交流传输并网送出

英国目前所有海上风电场均采用交流汇聚交流传输并网的方案,包括目前最大规模的海上风电场伦敦阵列(London array, 630 MW)和在建设中的海上风电场 Hornsea Project One,风场通过3条交流220 kV海缆送出,海缆长度142 km。我国第1个真正意义的海上风电场为江苏东台海上风电场,容量为200 MW,通过220 kV交流海缆将海上升压站电能送至路上集控中心。目前,我国所建海上风电场送出线路以交流电缆为主^[81-82]。

文献[44]采用奇异值分解法进行交流线路的保护,该方法能够快速识别区内、外故障,且识别时间短于5 ms,在交流电缆送出线路的保护上有借鉴意义;此外,该方法利用注入法快速获得故障电流进行故障检测^[80]。针对海上风电的交流电缆送出线路的保护研究较少,可以借鉴海上风电交流电缆定位方法中的一些研究,如基于多端故障行波时差的海底观测网故障定位方法^[83],利用智能分支单元(branch unit, BU)确定故障线路,通过对比故障前后的行波波头到达时差矩阵的差异确定故障点位置,该方法实现简单、定位准确,可为海底观测网电力系统安全可靠运行提供保障。为了适应大容量海上风电场并网,往往会通过统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)来进行补偿,针对不可预测的风速和UPFC的各种不同运行模式,提出利用线路两端正序电流幅值变化的符号进行故障检测,所利用的电气量为三相暂态电流^[84]。

3.3.2 直流传输并网送出

海上风电场经过柔直线路送出时,其换流器的故障特征呈现受控电压源特征,直流换流器的快速闭锁会造成故障电流幅值受限、基频特征短暂,影响继电保护对故障线路的正确判断^[43]。

考虑到海上风电系统中电缆线路具有较大的

分布电容,文献[85]采用分布参数模型,根据行波的传输特征,采用正向行波和反向行波幅值比来判断故障方向,该方法不受暂态分布电容电流的影响,适用于海上风电送出线路。对于海上风电接入多端直流系统的故障检测,文献[86]提出了一种基于暂态电流均值的故障检测方法,该方法所需采样率较低,由于每采集一个采样点只需要2次加减和1次乘除运算,因此计算复杂度较小,很适合实时计算。实际风电场经过直流线路输电发生故障时,系统为了可靠地进行故障穿越,一般要求几毫秒内快速动作,但可能会受雷击等因素干扰,因此其可靠性有待验证。

随着新能源并网技术的发展,陆上风电的相关并网技术得到了提升,而海上风电并网技术还不成熟,海上风电场受环境影响更大,且装机容量更大,故障后短路电流波动性也较大。可见,对于海上风电并网,需要针对海上的实际运行模式及其风机特性等进行建模分析。

表3对目前文献中报道的大规模风电场送出线路的暂态量保护方法进行了归纳。通过表3可以看出,传统工频量保护和暂态量保护各有利弊。基于暂态量保护的原理所利用的时窗短,将暂态量保护应用于大规模风电场送出线路保护将会是未来的研究热点。

表3 大规模风电场送出线路的暂态量保护方法汇总

Tab.3 Summary of transient protection methods for transmission lines connected to large scale wind farms

类别	参考文献	发表年度	研究方法	采样数据	适用性	技术局限
基于双端波形比较保护	[69,72]	2020	基于斯皮尔曼等级系数的纵联保护 基于结构相似度与平方误差的纵联保护	双端的暂态电流	抗过渡电阻和噪声能力强; 不需要较高的采样率; 适应于新能源弱出力; 适应于断路器重合于永久性故障	双端数据同步误差; CT 传变误差
	[43,73]	2019	基于余弦相似度的纵联保护	双端的暂态电流	抗过渡电阻和噪声能力强; 容易实现工程应用	双端数据同步误差; 时窗长度的影响
	[70,62]	2018	基于暂态电流波形相关性	双端的暂态电流	抗过渡电阻和噪声能力强; 灵敏性好	双端数据同步误差; 时窗长度的影响
基于故障行波保护	[84]	2021	基于行波方向的纵联保护	双端的暂态电压	不受暂态分布电容电流影响; 耐过渡电阻能力强; 速动性好	采样率高; 阈值的设定问题; 近端故障可能存在死区
时域距离保护	[64]	2018	基于时域全量故障模型相关性判别的集的纵联保护	双端的暂态电压和暂态电流	不涉及信号的频域信息; 较高的灵敏度; 采样率低; 速动性好;	线路近区发生故障时存在死区; 长线路分布电容的影响
单端快速保护	[58]	2019	高频突变量距离保护	单端的暂态电压	耐过渡电阻能力强; 采样率低; 速动性好	谐波的干扰; 风机控制策略的影响
	[86]	2020	基于暂态电流均值的故障检测方法	单端的暂态电流	计算复杂度小; 耐过渡电阻能力强; 采样率低	阈值的设定问题; 分布电容的影响
双端快速保护	[75]	2019	基于电流幅值比的纵联保护	双端的暂态电流	计算复杂度小; 适应于新能源弱出力; 适应于断路器重合于永久性故障	阈值的设定问题; 双端数据同步误差

4 大规模风电场并网暂态保护技术展望

随着大规模风电场在我国西北及南方地区的建设,未来我国电网中风电的占比将会越来越大。从研究现状看,对于大规模风电场接入电网的暂态保护在国内外并没有统一看法,相关研究工作也未系统展开。笔者认为,需从以下几方面展开未来的研究工作。

1) 故障后暂态量特征研究 随着风电场容量和送出线路长度的逐渐增加,需改进传统电力系统

故障时的暂态量分析来准确识别含高比例新能源电网的暂态故障特性。同时,伴随着电力电子器件的大量投入使用,还需要关注变流器的非线性、多时间尺度特征,以及其受扰后引发的宽频段振荡等问题。此外,控制响应下的故障电流特性与控制策略密切相关,风电机组在变流器控制策略与直流控制技术相互影响下的短路电流暂态特征也应该引起研究人员的注意。

2) 风电场输电线路保护研究 风电场输电线路短路故障会造成母线电压降低,如果不能迅速切

除故障,必将造成大面积事故。此外,由于风电场持续提供短路电流的能力较差,短路电流的波形会变得更加复杂。为了实现精准的故障识别和隔离,必须考虑电网提供的短路电流,同时涉及定值配合和延时配合的问题,其中一个处理不好就会影响风电场和电力系统的安全稳定。因此,很有必要分析大规模风电场输电线路的故障特点,开发性能优良的风电场输电线路及网络保护的新原理。

3) 风电机组的故障穿越技术 大规模风电的接入需要考虑风电机组本身故障穿越能力、风电并网技术和新型继电保护方案的综合策略,风电机组在暂态过程中的故障穿越特性与过电压水平密切相关,暂态过电压问题目前已经成为影响系统稳定性的关键因素,严重时限制输电工程的外送能力。因此,如何进一步提高风电机组的故障穿越能力也是未来需要关注的研究领域。

4) 人工智能技术在暂态保护领域的应用 大规模风电场接入电网后会导致电力系统惯性降低,运行状态不确定性增加,可预估性降低,系统暂态稳定问题日渐突出。广域测量技术、多代理技术以及人工智能算法可应用在复杂电网保护领域,特别是在故障识别上比传统方法具有更快的速度和较高的精度。目前人工智能运用在电力系统的保护与控制仍处于发展阶段,人工智能技术在大规模风电场暂态保护上的应用也将是未来一个重要的研究方向。

5 结 语

本文对大规模风电场并网技术和送出线路的暂态量保护进行了综述,介绍了3类并网技术(HVAC、HVDC、LFAC),总结了基于双馈异步风力发电机组和直驱永磁同步风力发电机组风电场并网后故障时的暂态特征,以及暂态量保护应用于风电场的研究现状。在梳理现有适用于风电场送出线路的暂态量保护研究进展的基础上,对大规模风电场暂态保护技术进行了展望,以期对未来大规模风电场并网的研究提供参考。

【参 考 文 献】

[1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.

[2] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[3] 陶鸿飞, 谢栋, 赵福林, 等. 含大规模风电并网电力系统的关键线路综合辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 115-123.
TAO Hongfei, XIE Dong, ZHAO Fulin, et al. Comprehensive identification of critical line in power systems with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 115-123.

[4] 曹娜, 史文秀, 朱春华. 直驱永磁同步风力发电机电力学特性仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 104-109.
CAO Na, SHI Wenxiu, ZHU Chunhua. Simulated analysis of dynamic characteristics of permanent magnet direct-drive synchronous wind turbine generators[J]. Electric Machines and Control Applications, 2017, 44(1): 104-109.

[5] YANG B, ZHANG X S, YU T, et al. Grouped grey wolf optimizer for maximum power point tracking of doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 133: 427-443.

[6] CHEN J, YAO W, ZHANG C K, et al. Design of robust MPPT controller for grid-connected PMSG-based wind turbine via perturbation observation based nonlinear adaptive control[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 478-495.

[7] MENG Y, YAN S, WU K, et al. Comparative economic analysis of low frequency AC transmission system for the integration of large offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1955-1968.

[8] KALAIR A, ABAS N, KHAN N. Comparative study of HVAC and HVDC transmission systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1653-1675.

[9] 喻崧. 适应可再生资源接入与电力超远距离传输的线路保护新原理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 3-6.
YU Kun. Research on novel principles of line protection adaptive renewable energy integration and extra-longdistance power transmission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 3-6.

[10] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.

[11] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.

[12] 樊艳芳, 侯俊杰, 晁勤, 等. 一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型误差修正距离保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 10-18.
FAN Yanfang, HOU Junjie, CHAO Qin, et al. A time-domain equation model error correction distance protection for transient overtaking of cluster wind power transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 10-18.

- [13] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [14] JIA K, GU C J, XUAN Z W, et al. Fault characteristics analysis and line protection design within a large-scale photovoltaic power plant[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4099-4108.
- [15] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [16] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216-224.
OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current of doubly fed wind generator under lower voltage ride through[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2017, 32(22): 216-224.
- [17] 王欣. 风电场送出线路故障暂态分析及保护方案研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 20-26.
WANG Xin. Research on fault characteristics and protection scheme of wind farm transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 20-26.
- [18] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 13.
CHI Yongning LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 13.
- [19] ZHOU H Y, YAO W, AI X M, et al. Coordinated power control of electrochemical energy storage for mitigating subsequent commutation failures of HVDC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 1-14.
- [20] SUN K, YAO W, FANG J, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected DFIG-based wind farm with a VSC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 99: 1.
- [21] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 6.
ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, GUO Chunyi, et al. Valve loss calculation of MMC HVDC based on piecewise analytical formula[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 6.
- [22] NAMI A, RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTES S, et al. Control of the parallel operation of DR-HVDC and VSC-HVDC for offshore wind power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 99: 1-1.
- [23] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 13.
CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 13.
- [24] SHI G, CAI X, SUN C, et al. All-DC offshore wind farm with parallel connection: an overview[C]. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China, 28-29 May, 2016.
- [25] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [26] XIANG X, MERLIN M, GREEN T C. Cost analysis and comparison of HVAC, LFAC and HVDC for offshore wind power connection[C]. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China, 28-29 May, 2016.
- [27] LIU H, CHEN Z. Fault ride-through and grid support of permanent magnet synchronous generator-based wind farms with HVAC and VSC-HVDC transmission systems[C]. 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition. Florence, Italy, 9-12 September, 2012: 769-773.
- [28] FOSTER S, XU L, FOX B. Control of an LCC HVDC system for connecting large offshore wind farms with special consideration of grid fault[C]. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA, 20-24 July, 2008: 1-8.
- [29] 宋卓彦, 王锡凡, 滕予非, 等. 变速恒频风力发电机组控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 8-17.
SONG Zhuoyan, WANG Xifan, TENG Yufei, et al. Overview of control technologies for variable-speed constant-frequency wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 8-17.
- [30] 李生虎, 唐彩林, 吴东, 等. 基于电压相位比较的双馈风电场输电线路单相接地距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 1-7.
LI Shenghu, TANG Cailin, WU Dong, et al. Single-phase grounding distance protection for doubly-fed wind farm transmission lines based on voltage phase comparison[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 1-7.
- [31] 林俐, 潘险险, 张凌云, 等. 基于免疫离群数据和敏感初始中心的 K-means 算法的风电场机群划分[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5461-5468.
LIN Li, PAN Xianxian, ZHANG Lingyun, et al. The K-means clustering algorithm for wind farm based on immune-outlier data and immune sensitive initial center[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5461-5468.
- [32] 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 equivalent for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19.
- [33] LI W, CHAO P, LIANG X, et al. An improved single-machine equivalent method of wind power plants by calibrating power recovery behaviors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4371-4381.
- [34] HAJ-AHMED M A, FEILAT E A, KHASAWNEH H J, et al. Comprehensive protection schemes for different types of wind generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2051-2058.

- [35] 靳方超. 双馈风电场接入对其送出线路保护的影响[D]. 天津: 天津大学, 2014: 16-18.
JIN Fangchao. Influence of DFIG wind farms integration on transmission line protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 16-18.
- [36] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [37] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅. 电网故障下含 DFIG 的风电场暂态电流特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(2): 166-171.
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei. Transient current characteristic analysis of wind farm containing DFIG under grid fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(2): 166-171.
- [38] CHANG Y Z, HU J B, SONG G B, et al. Impact of DFIG-based wind turbine's fault current on distance relay during symmetrical faults[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(16): 3097-3102.
- [39] MA J, ZHANG W, LIU J, et al. Research on short circuit current characteristics of doubly-fed wind power generator considering converter regulation[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 45(19): 2118-2130.
- [40] 陈玉. 基于输电线路暂态分量的快速距离保护原理及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019: 48-56.
CHEN Yu. Theory and applications of fast distance relays based on transmission lines transient components[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 48-56.
- [41] 郑涛, 魏占朋, 迟永宁, 等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈式风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 25-30.
ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, CHI Yongning, et al. Short-circuit current characteristics of doubly fed induction generator considering crowbar protection insertion time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 25-30.
- [42] 杨启帆. 含 DFIG 电网的故障分量方向保护[D]. 济南: 济南大学, 2019: 2-5.
YANG Qifan. Fault component directional protection of power grid with DFIG[D]. Jinan: University of Jinan, 2019: 2-5.
- [43] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6275.
JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [44] 郑黎明, 贾科, 侯来运, 等. 基于奇异值分解的海上风电接入柔直系统的交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 75-83.
ZHENG Liming, JIA Ke, HOU Laiyun, et al. Singular value decomposition-based AC line protection of offshore wind power connected to flexible straightening system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Suppl.1): 75-83.
- [45] CHANG Z, SONG G, WANG T. Analysis on current characteristics of PMSG under grid three-phase fault[J]. The Journal of Engineering, 2018, 15(10): 785-790.
- [46] 杨昕亮. 直驱永磁同步风力发电系统短路故障特征研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014: 29-32.
YANG Xinliang. Direct-drive permanent magnet synchronous wind power system short-circuit fault characteristics[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014: 29-32.
- [47] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 54-59.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 54-59.
- [48] KUNJUMHAMMED L P, PAL B C, GUPTA R, et al. Stability analysis of a PMSG-based large offshore wind farm connected to a VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1166-1176.
- [49] 蔺红, 晁勤. 直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究[J]. 电网技术, 2010, 36(8): 145-151.
LIN Hong, CHAO Qin. Research on reduced-order model of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[J]. Power System Technology, 2010, 36(8): 145-151.
- [50] 徐力, 王刚, 侍乔明, 等. 直驱永磁风电机组电压暂态简化建模及仿真[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 47-51.
XU Li, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A simplified modeling of transient voltage and simulation of direct drive permanent magnet synchronous generator[J]. Electric Machines and Control Applications, 2015, 42(9): 47-51.
- [51] 蔡旭, 李征. 风电机组与风电场的动态建模[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 82-83.
CAI Xu, LI Zheng. Dynamic modeling of wind turbines and wind farms[M]. Beijing: Science Press, 2016: 82-83.
- [52] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
ZHENG Bowen, WANG Zengping, LYU Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25.
- [53] 田涛涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 71-78.
TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 71-78.
- [54] 樊壮. 基于非工频量提取的风电系统送出线路距离保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 20-30.
FAN Zhuang. Research on distance protection of wind power system transmission line based on extraction of non-power frequency quantities[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 20-30.
- [55] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
LYU Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.
- [56] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6593.
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot

- protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6593.
- [57] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [58] SONG F, TEN C F. Application of differential protection to offshore wind farm for earth fault detection with substantially unbalanced charging current[J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(15): 836-840.
- [59] 贾科, 杨哲, 赵其娟, 等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3271-3280.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3280.
- [60] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [61] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 61-66.
QIU Yutao, PAN Wulue, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.
- [62] ZHANG X Y, LU Y P, SHI D M. The transient distance protection on wind farm transmission line with crowbar protection[C]. 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, China, Sept., 2017: 366-371.
- [63] 王春又, 孙士云, 毛肖, 等. 应于双馈风电场送出线的时域距离纵联方向保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 82-94.
WANG Chunyou, SUN Shiyun, MAO Xiao, et al. Time-domain distance longitudinal direction protection adapted to the transmission line of doubly-fed wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 82-94.
- [64] 侯俊杰, 樊艳芳, 晁勤, 等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 89-96.
HOU Junjie, FAN Yanfang, CHAO Qin, et al. Cluster wind power transmission line pilot protection based on the correlation of time-domain full fault models[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 89-96.
- [65] 张太升, 韩伟, 杨霖, 等. 基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 82-88.
ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection of doubly-fed wind farm transmission lines based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.
- [66] 陈玉, 文明浩, 胡列翔, 等. 双馈风机风电场联络线出口故障方向判别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 1-6.
CHEN Yu, WEN Minghao, HU Liexiang, et al. Distinguishing the fault direction of the tie-line outlet of doubly-fed wind farms[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2020, 32(2): 1-6.
- [67] 史卓鹏, 孔祥敏, 王亚臣. 基于波形相似度因子的双馈风电场送出线路单相接地保护[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 108-113.
SHI Zhuopeng, KONG Xiangmin, WANG Yachen. Single-phase grounding protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform similarity factor[J]. Electric Machines and Control Applications, 2021, 48(6): 108-113.
- [68] 杨哲. 规模化新能源送出线路保护新原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 6-10.
YANG Zhe. Research on the new principle of large-scale new energy transmission line protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 6-10.
- [69] 贾科, 杨哲, 魏超, 等. 基于斯皮尔曼等级相关系数的新能源送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 103-111.
JIA Ke, YANG Zhe, WEI Chao, et al. Pilot protection based on spearman rank correlation coefficient for transmission line connected to renewable energy resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 103-111.
- [70] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. New energy field and station transmission line pilot protection based on the correlation of transient current waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019.
- [71] 李彦宾. 新能源场站送出线路继电保护原理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 56-60.
LI Yanbin. Research on the principle of relay protection for the transmission lines of new energy stations[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 56-60.
- [72] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于结构相似度与平方误差的新能源场站送出线路纵联保护综合判据[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1788-1797.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Comprehensive criteria of pilot protection based on structural similarity and square error for outgoing line from renewable power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1788-1797.
- [73] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的新能源场站 T 接型送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 111-119.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Cosine similarity based pilot protection of teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111-119.
- [74] 葛彤辉. 基于故障暂态差异的双馈风电场保护研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2019: 30-35.
GE Tonghui. Research on doubly-fed wind farm protection based on fault transient difference[D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2019: 30-35.

- [75] 贾科, 杨哲, 朱正轩, 等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路 T 接纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 82-88.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 82-88.
- [76] LV Z, WANG Z P, XU W Y. Transient waveform characteristics based current differential protection of wind farm outgoing line[C]. 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Xi'an, China, Oct., 2019: 1713-1718.
- [77] 曹善军, 王金雷, 吴小钊, 等. 海上风电送出技术研究浅述[J]. 电工电气, 2020(9): 66-69.
CAO Shanjun, WANG Jinlei, WU Xiaozhao, et al. Research on offshore wind power delivery technology[J]. Electrotechnical and Electrical Engineering, 2020(9): 66-69.
- [78] 王鑫, 王海云, 王维庆. 大规模海上风电场电力输送方式研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(22): 55-62.
WANG Xin, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Research on power transmission mode of large-scale offshore wind farms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 55-62.
- [79] DAKIC J, CHEAH-MANE M, GOMIS-BELLMUNT O, et al. HVAC transmission system for offshore wind power plants including mid-cable reactive power compensation: optimal design and comparison to VSC-HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2814-2824.
- [80] LIR, YU L J, XU L. Offshore AC fault protection of diode rectifier unit-based HVDC system for wind Energy transmission[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5289-5299.
- [81] 徐彬, 薛帅, 高厚磊, 等. 海上风电场及其关键技术发展现状与趋势[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 227-235.
XU Bin, XUE Shuai, GAO Houlei, et al. Development status and prospects of offshore wind farms and its key technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 227-235.
- [82] 文锋. 我国海上风电现状及分析[J]. 新能源进展, 2016, 4(2): 152-158.
WEN Feng. Developments and characteristics of offshore wind farms in China[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(2): 152-158.
- [83] 曾祥君, 毛宇, 邓丰, 等. 基于多端行波时差的海底观测网故障定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3280-3287.
ZENG Xiangjun, MAO Yu, DENG Feng, et al. Fault location method for seafloor observation network based on multi-terminal traveling wave time difference[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3280-3287.
- [84] BISWAS S, NAYAK P K. A fault detection and classification scheme for unified power flow controller compensated transmission lines connecting wind farms[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 297-306.
- [85] 刘树, 杨林刚, 刘斌, 等. 海上风电柔性直流送出线路的纵联保护方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 81-88.
LIU Shu, YANG Lingang, LIU Bin, et al. Pilot protection method for flexible DC transmission lines of offshore wind power[J]. Journal of Electric Power System and Automation, 2021, 33(3): 81-88.
- [86] 李佳朋, 李宇骏, 袁泉添, 等. 远海风能集中接入的多端直流系统直流故障分析与故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 119-128.
LI Jiapeng, LI Yujun, YUAN Xiaotian, et al. DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 119-128.

(责任编辑 李园)