

沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统中交流继电保护面临的挑战与对策

李 岩¹, 周博昊², 何佳伟², 曹润彬¹, 郑 涛³

(1. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院有限公司), 广州 510080;

2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风电光伏基地建设成为国家重大战略需求, 新能源经构网柔直外送是偏远地区大规模新能源基地远距离外送的优选方案。一方面故障特征显著发生变化, 另一方面继电保护的难度大幅提升, 从而威胁系统安全恢复。为此, 聚焦大规模可再生能源经构网柔直送出场景, 首先梳理了大规模可再生能源柔直构网送出系统所面临的风险与挑战, 围绕如何精确揭示故障特性、如何精准辨识故障区域与如何保障系统快速安全恢复等 3 个关键问题展开, 归纳总结了现阶段内针对故障特性算不准、故障区域辨不明、故障安全恢复难等 3 个关键问题的研究现状, 最终从模型融合迭代、依赖与不依赖电源特性融合统一、主动支撑型控保协同策略等 3 方面展开, 探讨了可能的解决思路。研究内容可为沙戈荒大规模可再生能源外送系统的控制保护提供参考。

关键词: 构网; 继电保护; 新能源; 模块化多电平变流器; 控保协同技术; 故障特性计算

Challenges and Countermeasures of the AC Relay Protection in Grid-forming MMC Integrated with Large-scale Renewable Generations in Deserts

LI Yan¹, ZHOU Bohao², HE Jiawei², CAO Runbin¹, ZHENG Tao³

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is a major strategic need for our nation to develop the large-scale wind and photovoltaic power in desert or the deep-sea regions. Modular multilevel converter-based high voltage direct current (MMC-HVDC) is considered as the mainstream solution for long-distance power delivery. However, in the grid-forming MMC integrated with renewable generations, on the one hand, the characteristics of faults have significantly changed. On the other hand, the difficulty of relay protection has greatly increased, thereby threatening the secure recovery of the system. We focus on the scenarios of large-scale renewable energy transmission via MMC-HVDC, present the challenges faced by such a system, and describe how to accurately calculate fault characteristics, reliably identify fault zones, and rapidly and safely recover the system. Moreover, we summarize the current research status on three key issues: the inaccurate fault characteristic calculations, unreliable fault area identification, and difficulties in secure fault recovery. Finally, we explore the potential solutions from three aspects: model-based iterative fusion, protection scheme based on or independent of the source characteristics, and the coordination strategy of the control and protection. The research can provide reference for the control and protection of large-scale renewable energy transmission systems in desert region.

Key words: grid-forming; relay protection; renewable energy; MMC; coordination strategy of relay protection and control; fault characteristic calculation

0 引言

构建以新能源为主力电源的新型电力系统是实现“双碳”目标的重要支撑。截止到 2024 年 10 月底，全国风电、光伏总装机容量达到 11 亿 kW，其中太阳能发电装机容量约 8.18 亿 kW，同比增长 46.7%；风电装机容量约 4.92 亿 kW，同比增长 19.2%^[1]。《“十四五”可再生能源发展规划》明确，大力推进风电和光伏发电基地化开发。其中“沙戈荒”地区大型风电光伏基地总规模达 4.55 亿 kW^[2]。加快推进沙漠、戈壁、荒漠地区的大型风电光伏基地建设成为国家重大战略需求。

大规模新能源外送形式包括交流送出、常规直流送出和柔性直流送出等^[3]，由于沙漠、戈壁、荒漠等大规模新能源基地远离主干电网，缺乏同步电源支撑，而基于电压源换流器的柔性直流输电具有输电距离远、有功无功独立控制的优点^[4]，且无需电网支撑换相，可实现送端交流孤网的电压频率主动支撑^[5]，因此新能源经构网柔直外送是偏远地区大规模新能源基地远距离外送的优选方案。

近年来，国内外已经在高比例新能源(近 100%)柔直外送方面开展了多个工程实践。自 2010 年德国投运第 1 个远海风电柔直送出工程 BorWin1 工程以来，欧洲已陆续投运多期海风柔直送出工程。我国南方电网公司在 2013 年投运的南澳三端柔直工程，首次实践了海岛风电经多端柔直送出方案。2020 年国家电网公司投运的张北柔直电网实现了康保、张北站 100%清洁能源(风、光、储、水)的孤岛送出^[6]。自 2010 年后，全球范围内典型的新能源柔直送出工程如表 1 所示。

沙戈荒地区的大规模新能源经柔直外送系统的单个工程容量会达到千万千瓦级，覆盖范围超过数万平方千米，并涵盖 35 kV、220 kV、500 kV 多个电压等级。一方面，该系统下电力电子换流器渗透率较高，系统短路比低、系统惯量低，故障后电压频率波动大，极易引发新能源连锁脱网，电网稳定高度依赖于继电保护与控制系统；另一方面，电网故障受电力电子控制深度影响，故障特征显著变化，传统电网的故障分析方法适用性降低；同时，故障短路电流幅值受限、相角受控，致使基于工频量的常规保护的拒动/误动风险提升，继电保护的难度增加。此外，电力电子设备主导下的故障特性与暂态穿越策略高度耦合，对故障识别与系统恢复造

成深刻影响的同时，也为保护识别、系统恢复提供了全新契机，需要从多电力电子设备协同、控制保护融合的角度出发，挖掘更为主动的系统防御技术，从而突破沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统安全恢复的难题。

因此，本文聚焦沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统，从如何精确揭示电网故障特性、如何精准识别故障与非故障工况、如何快速安全恢复系统正常运行等 3 个问题展开，归纳总结了该场景下继电保护面临的风险与挑战，提出了一些思考和建议。

1 多电力电子设备“非线性、强耦合”，故障特性算不准

1.1 “非线性、强耦合”的内涵

在继电保护所关注的电磁暂态时间尺度下，同步电机的转速不变，仍等效为恒定内电势、恒定内阻抗的电压源。因此，通过求解一阶常系数线性非齐次微分方程，可以有效获得常规交流系统三相故障短路电流的解析计算式(包含着周期分量和非周期分量)。相比之下，跟网或构网型电力电子的短路电流主要取决于无源元件的短时放电特性和电力电子设备的控制、调制方式(特别是穿越控制方式)。在常规新能源交流并网系统中，“非线性”已有所体现，主要与控制策略主动切换、控制饱和限幅、锁相环动态跟踪性能等多个环节有关。毋庸置疑，构网型电力电子设备仍具备上述电力电子设备的非线性特征；且相比之下，由于其在构网控制结构、故障穿越策略、定频控制方式等方面的差异，其“非线性”表现出更加丰富的外现形式。

表 1 国内外新能源柔直送出工程

Table 1 MMC-HVDC projects integrated with renewable energies generations					
工程名称	直流电压/ kV	送端电压/ kV	传输容量/ MW	应用场景	年份
BorWin1	±150	33/155	400	海风送出	2010
SylWin1	±320	33/155	864	海风送出	2014
BorWin2	±300	33/155	800	海风送出	2015
DolWin1	±320	33/155	800	海风送出	2015
DolWin2	±320	33/155	916	海风送出	2017
BorWin3	±320	66	900	海风送出	2019
DolWin5	±320	66	900	海风送出	2024
南澳	±160	110	350	海岛供电	2013
舟山	±200	110/220	1 000	海岛供电	2014
张北	±500	35/220	4 500	风光水送出	2020
如东	±400	35/220	1 100	海风送出	2021
青州	±500	66	2 000	海风送出	2024
阳江	±500	66	2 000	海风送出	2024

此外,“强耦合”是该系统的另一显著特征。跟网型电力电子设备需要根据并网点电压情况,馈出幅值受限、相角受控的电流。而构网设备作为系统电压、频率控制的关键节点,在系统发生故障后,构网、跟网设备之间存在着深刻且复杂的耦合关系,这种耦合关系给系统级故障响应计算和典型故障特征的提取带来了全新的挑战。“非线性”是该系统的表象现象,而“强耦合”则是该系统的深层本质。理解并合理地处理“非线性、强耦合”现象是从单体电力电子设备到全电力电子化系统,以及从常规新能源交流并网系统到新能源-构网柔直系统故障响应认知的关键。

1.2 跟网型换流器故障特征

目前针对电力电子设备故障特征的研究仍以跟网型电力电子设备为主,通常从短路电流大小^[7]、波形特征^[8]、序分量特征^[9]等角度展开研究。

跟网型换流器的故障特征分析研究起步较早,根据不同故障发展演变的时间尺度进行划分,可分为行波初始阶段、控制暂态阶段与故障稳态阶段。在行波初始阶段(一般在故障后数毫秒内),跟网型换流器的控制策略并未发生切换,短路电流是控制响应和 LCL(inductor-capacitor-inductor)滤波器放电电流的叠加,因此在行波初始阶段跟网型换流器的短路电流($I_{\text{GFL-I}}$)^[10]可表示为:

$$I_{\text{GFL-I}} = A_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + e^{-\alpha_2 t} A_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) \quad (1)$$

式中: A_1 、 A_2 、 ω_1 、 ω_2 、 β_1 、 β_2 分别为控制响应电流、滤波器电容电流幅值、角频率与初相角; α_2 为滤波器放电回路的衰减时间常数。

如图 1 所示, LCL 滤波器与部分经变压器折算至电压侧的线路阻抗共同构成了 2 阶零输入的 RLC 放电电路, R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为等效电阻、电感、电容。以 0.5 kW 功率的并网逆变器为例,其配套的 LCL 滤波器的 L_2 约 1.03 mH,配套的 C_1 约 15 μF ^[11]。在不考虑电阻损耗,忽略线路折算阻抗的情况下,放电频率可达 8 045.18 Hz,虽然在考虑线路折算阻抗的情况下,放电频率有所下降,但仍保持着较高的水平。

故障发生数毫秒后,一旦换流器的控制策略切换至故障穿越策略,则跟网型换流器即进入控制暂态阶段。此时,在忽略锁相环跟踪误差的情况下,通过求解 2 阶线性微分方程组,即可求解故障暂态期间的短路电流,以 d 轴为例,短路电流可表示为式(2)的形式^[12]。

$$I_{\text{GFL-d-II}} = A_1 e^{\frac{R}{L}(t-t_0)} + A_2 e^{-\frac{1}{\tau_1}(t-t_0)} + A_3 \quad (2)$$

式中: t_0 为故障时刻; R 、 L 分别为滤波电路的电感与电阻分量; τ_1 为控制回路的衰减时间常数; A_1 — A_3 应满足如下关系:

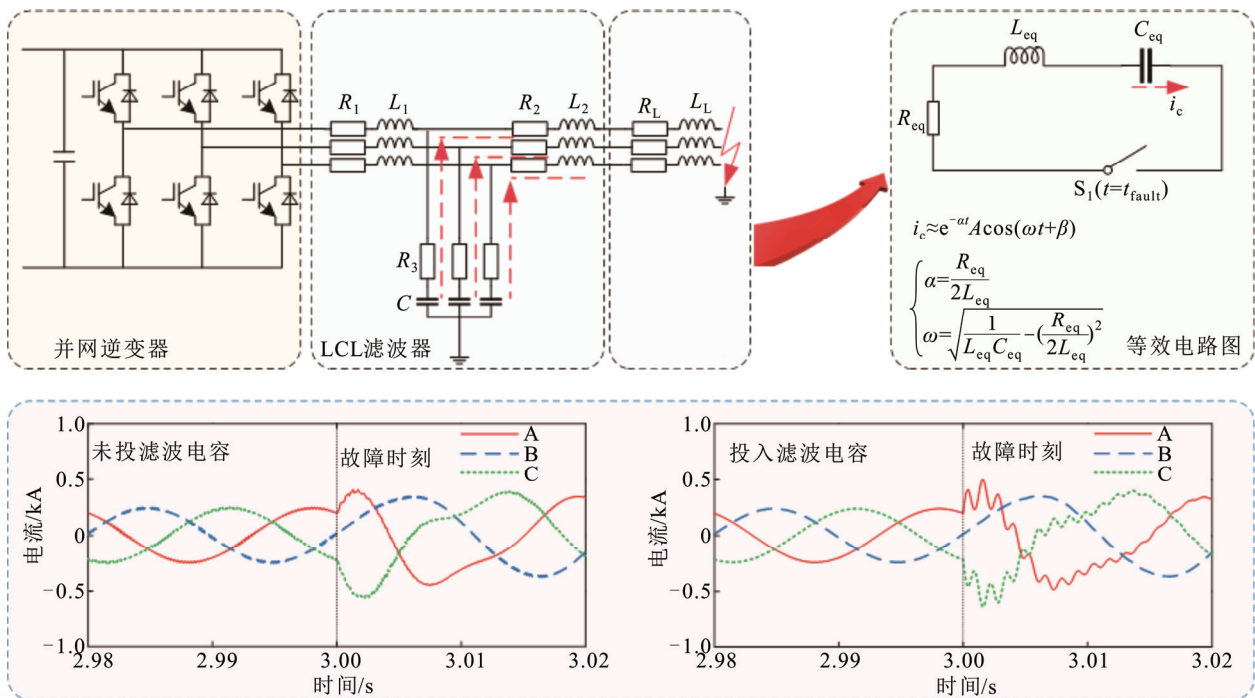


图 1 跟网型电源在行波初始阶段故障特性示意图

Fig.1 Schematic diagram of fault characteristics at the initial stage of traveling wave in grid-following power sources

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -\frac{k_p}{L} & \frac{k_p}{L} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d(t_{0-})_{\text{ref}} \\ I_d(t_{0+})_{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为电流内环的比例系数、积分系数; $I_d(t_{0-})_{\text{ref}}$ 、 $I_d(t_{0+})_{\text{ref}}$ 分别为故障前后 d 轴电流指令值; λ_1 、 λ_2 表达式如下所述。

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{-(R+k_p) + \sqrt{(R+k_p)^2 - 4k_i L}}{2L} \\ \lambda_2 = \frac{-(R+k_p) - \sqrt{(R+k_p)^2 - 4k_i L}}{2L} \end{cases} \quad (4)$$

也有部分文献在此基础上, 通过计及控制饱和切换^[13-14]、锁相环动态跟踪性能^[15-16]等因素, 进一步完善补充短路电流的计算式。在计及上述因素后, 短路电流中将出现不受锁相环、电流内环影响的工频分量, 受锁相环影响、受电流内环影响或二者共同影响的振荡衰减电流, 以及衰减的直流分量^[17]。随着故障时间的进一步增加, 最终将达到故障稳态阶段, 此时短路电流与故障穿越标准和设备限流方式高度相关, 以光伏为例, 此时正序 d 、 q 轴稳态电流^[18]可表示为:

$$\begin{cases} i_{\text{GFL}q\text{-III}} = \begin{cases} 2Q_N/3k_u U_N, & k_u > 0.9 \\ 1.5(0.9 - k_u)I_N, & 0.2 \leq k_u \leq 0.9 \\ 1.05I_N, & k_u < 0.2 \end{cases} \\ i_{\text{GFL}d\text{-III}} = \min\left(2P_N/3k_u U_N, \sqrt{I_{\text{max}}^2 - i_{q(1)}^2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_N 、 Q_N 为稳态有功、无功功率; k_u 为标幺化并网电压; I_{max} 为电流限幅值; I_N 、 U_N 分别为额定电流、电压; $i_{q(1)}$ 为正序 q 轴电流。

相比同步电源, 跟网型换流器单体设备层具备以下特征:

- 1) 跟网型电力电子设备在故障后的行波初始阶段, 短路电流频谱的高频段较为丰富。
- 2) 在暂态控制响应阶段, 由于控制饱和、锁相环跟踪性能下降, 因此短路电流中含有高比例的谐波, 非周期的分量会影响 Fourier 变换的精度^[19-20]。
- 3) 跟网型换流器的限幅环节和故障穿越策略, 导致故障稳态阶段短路电流的幅值受限、相角受控^[21]。

4) 跟网型换流器的内阻抗会快速的变化, 这与同步电机稳定且接近 90° 的阻抗角有较大区别^[22]。

5) 跟网型换流器具备灵活可控的负序电流、电压抑制、负序电流吸收(注入)、负序功率抑制功

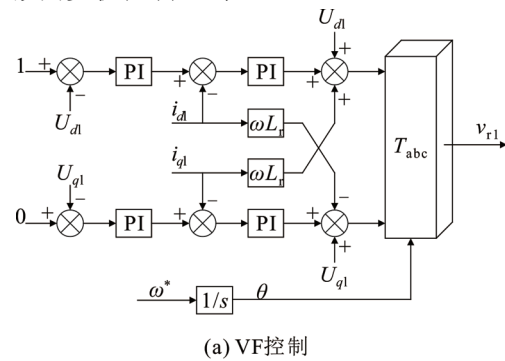
能, 相比同步电源具备更复杂的负序分量^[23]。

1.3 构网型换流器故障特征

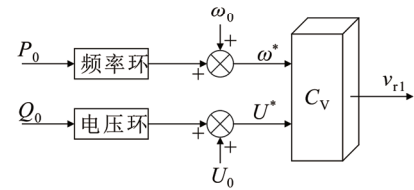
构网控制是电力电子换流器的另一种控制模式, 最早是在微电网的场景中被提出的, 主要用于极弱强度并网。该策略可以不需要借助锁相环实现同步并网, 还可以为系统提供一定的虚拟惯性或阻尼。主要的构网控制策略可分为: 电压/频率(voltage/frequency, VF)控制、功率同步控制(power synchronization loop, PSL)、虚拟振荡控制等。

VF 控制一般通过双环或单环控制电压幅值, 利用固定频率生成虚拟电压相角实现定电压幅值、定交流频率的目标, 一般用在沙戈荒、深远海等无主电源电网中^[24], 如图 2(a)所示。

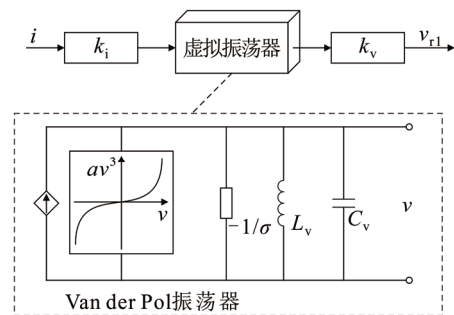
PSL 控制的设计思想在于模拟同步电机的特性, 使得构网换流器无需锁相环自同步并入有主电源电网中, 并在传导功率的同时为系统提供惯量支撑^[25], 如图 2(b)所示。功率同步控制中, 包含频率环、电压环 2 个关键控制环, 可被设计为一阶非惯性控制方式——下垂控制^[26]和 2 阶惯性控制方式——虚拟同步机控制^[27]等。



(a) VF控制



(b) PSL控制



(c) VOC控制

图2 主流的构网控制示意图

Fig.2 Structure of several widely used grid-forming control

虚拟振荡器控制(virtual oscillator control, VOC)可以生成考虑物理模型的正弦振荡电压调制波, 如图 2(c)所示, 是一种典型的 Van der Pol 振荡器^[28]。

对于沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统, 柔直承担着定频、定压的责任, 通常采取 VF 控制^[29], 并配置了正序主动降压的不对称故障穿越策略^[30]。文献[31]对高阻抗接地的对称单极系统故障特征展开分析, 指出在海上交流故障下, 海上风电柔直送出系统柔直侧存在着上桥臂、下桥臂及远端路上站等为主体构成的 3 个放电回路。在本征响应阶段, 对称单极系统的子模块放电电流可表示为:

$$I_{\text{GFM-I}} = e^{-\alpha_1 t} A_1 \cos(\omega_1 t + \beta_1) + e^{-\alpha_2 t} A_2 \cos(\omega_2 t + \beta_2) + e^{-\alpha_3 t} A_3 \cos(\omega_3 t + \beta_3) \quad (6)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 、 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 β_1 、 β_2 、 β_3 分别为 3 个放电回路的电流幅值、角频率与初相角。

由于相比 LCL 滤波器而言, 大容量柔直换流站的桥臂电感参数要更大, 因此在构网侧本征阶段下, 电容放电的频率有所降低。基于常规工程参数估计, 故障电流的频率会在 60~130 Hz 之间^[32]。文献[33]通过建立传递函数模型, 采用反变换的方式推导了故障暂态期间海上构网柔直换流器控制响应阶段的时域表达式, 如式(7)所示。

$$I_{\text{GFM-II}} = \frac{1}{Z_{M\Sigma}} \left(E_{\text{MHd}}^* \cos(\omega_{\text{MHk}} t + \theta_\phi) - E_{\text{MHq}}^* \sin(\omega_{\text{MHk}} t + \theta_\phi) + (E_{\text{MHd}0} - E_{\text{MHd}}^*) \frac{e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(\omega_{\text{MHk}} t + \theta_\phi) + (0 - E_{\text{MHq}}^*) \frac{e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \beta)}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cos(\omega_{\text{MHk}} t + \theta_\phi) \right) \quad (7)$$

式中: $Z_{M\Sigma}$ 为故障回路等效阻抗; E_{MHd}^* 、 E_{MHq}^* 、 $E_{\text{MHd}0}$ 分别为 d 、 q 轴电压外环指令值与实测值; ω_{MHk} 为控制响应角频率; θ_ϕ 为初相角; ξ 、 ω_d 、 ω_n 、 β 分别为系统阻尼比、阻尼振荡频率、系统频率、阻尼角。

但是在实际运行中, 为避免构网正序电压外环控制饱和而导致系统失稳, 往往配置主动降压控制。此时, 电压的 d 、 q 轴指令值会进一步发生变化, 式(7)仍需进一步研究更新。通常, 风机等跟网型变流器的 PI 参数会按照 I 型系统进行设计, 而柔直则按 II 型系统设计^[34], 因此, PI 参数的差异会直接造成控制响应阶段跟网、构网型换流器的频谱分布存在差异(如图 3 所示)。跟网型换流器与构网型换流器在故障后的行波初始阶段均会出现高频电容电流分量。然而, 由于 LCL 滤波器和子模块放电回路的差

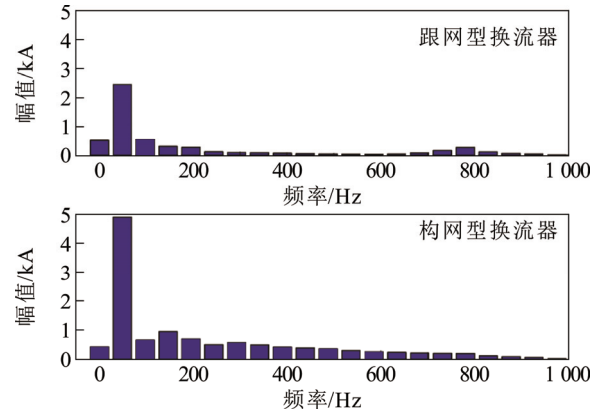


图 3 跟网/构网换流器频谱分布差异

Fig.3 Frequency spectrum distribution comparison between grid-following and grid-forming converters

异(其中构网柔直侧桥臂的等效电感较大), 因此相比跟网换流器, 构网侧换流器的短路电流在故障行波初始阶段的放电频率较低。

目前, 针对构网柔直在控制响应阶段的研究较少, 文献[35]利用动态相量理论, 构建了构网型换流器的故障等值模型。文献[36]指出, 在海上交流侧故障后, 如东换流站采取了低压限流穿越策略, 通过主动降低构网电压参考值实现交流故障穿越, 故障稳态阶段呈现出受控电压源的特征。文献[37]利用故障复合序网理论, 分析了不对称故障下海风柔直构网系统的交流故障特性, 指出在双侧采取负序电流抑制控制情况下, 单相接地/相间短路故障时, 系统的故障电流会被抑制到几乎为 0, 不利于保护的有效辨识。而对于三相对称故障则可在故障点处将送端电网分割为 2 个子网络, 双侧只提供正序电流^[38]。

高比例新能源经柔直送出多电压等级电网形态复杂、场景多样, 其送端交流故障特性受柔直、新能源等电力电子设备的控制策略影响显著, 故障机理研究仍停留在初探阶段, 理论体系尚不完善。需要结合仿真模型划分故障响应时间尺度, 探究多电力电子设备的耦合作用, 重点关注控制响应的暂态期间, 及影响继电保护性能的各种电气量在该阶段的特征及变化规律。

目前看来, 相比跟网型换流器, 构网型柔直换流器在单体设备层具备以下故障响应特征:

1) 构网型电力电子设备在故障后的行波初始阶段, 短路电流频谱同样在高频段较为丰富, 但由于子模块与桥臂电感构成的放电回路与 LCL 滤波器参数上的差异, 电容电流频率会低于跟网型换流器。

2) 在暂态控制响应阶段, 由于构网型柔直换

流器需要维持 VF 构网功能, 因此除极严重近区故障外, 正序电压外环并不会饱和, 最终导致短路电流求解的微分方程阶数更高。

3) 构网型柔直换流器不具备独立控制正序电流的能力, 其所有的控制目标均聚焦于实现 VF 构网。因此, 其故障稳态电流与电源侧等值阻抗、故障期间的降压穿越控制密切相关。建立构网型柔直换流器的故障穿越标准, 对于构网型换流器故障电流的计算具有重要意义。

4) 构网型换流器同样存在故障稳态阶段短路电流幅值受限、相角受控, 以及内阻抗会快速变化的特点。然而, 由于缺乏针对构网型换流器的相关穿越标准, 因此目前其具体的阻抗变化特征仍尚不明晰。

5) 构网型换流器一般采取负序电压抑制策略, 且在不对称故障下容易饱和, 进而转变为恒幅值的电流源。与跟网型换流器相比, 构网型换流器在降压穿越控制作用下会表现出独特的正负序电压耦合关系, 这一关系值得深入研究。

2 多电力电子设备“双弱馈、高谐波”, 故障区域辨不明

2.1 “双弱馈、高谐波”的内涵

同步电源在故障后的毫秒级时间尺度下, 旋转设备的惯性会导致其在强励方式下仍可等效为恒内电势、恒内阻抗的交流电压源, 因此故障电流往往是额定电流的数十倍。相比之下, 电力电子设备的过流能力有限, 因此会在控制环节进行限幅, 其短路电流一般为额定电流的 1.2~1.5 倍, 呈现出典型的弱馈特征。而在新能源经构网柔直送出系统中, 双侧均为电力电子换流器, 系统表现出双弱馈的特征。与常规新能源交流并网相比, 构网柔直换流器提供的短路电流一方面与自身构网电压外环有关, 另一方面还会对风场侧的短路电流产生影响。由于构网设备的负序电流存在限幅约束(一般为额定值的 0.2~0.5 倍不等), 而跟网设备采取负序电流抑制策略, 因此在单相接地故障、相间短路故障下, 构网设备的负序电流会直接影响故障点处的故障电流, 甚至会导致保护安装处的零序电流相位出现受控偏移。上述特点造成传统基于同步发电机的短路电流计算、保护配置与整定理论受到影响。

另一方面, 由于电力电子设备受控制、调整的影响, 因此系统短路电流中的谐波分量较高。同时,

受 PI 参数、系统参数等的影响^[39-40], 新能源经构网柔直送出系统的振荡风险增加, 在宽频域下具有丰富的振荡形式, 这对传统继电保护的可靠性提出了更高的要求。而现有研究主要面向新能源、柔直等电力电子单端或局部接入大电网以后的场景, 对高比例新能源基地送端电网保护原理的研究具有一定的借鉴意义, 相关工作调研如下所述。

2.2 保护性能评估

与传统同步电源相比, 新能源电源、直流换流器等电力电子设备具有供给故障电流幅值受限、频率偏移、谐波含量提升等特征^[41-42], 导致面向传统交流电网、以线性叠加原理为理论基础, 基于工频稳态量的距离、差动等保护原理难以适应, 从而使得误动、拒动风险提升。新能源送出线路中发生经过渡电阻的短路故障时, 保护测量阻抗由线路的阻抗和附加阻抗构成, 对于新能源侧的测量阻抗, 由于新能源电源短路电流幅值受限、系统侧电流的助增作用增强, 导致附加阻抗远大于过渡电阻, 新能源侧距离保护正向故障易出现拒动^[43]。目前, 已有一些研究报道了短路试验或实际工程中暴露出来的问题, 此处以 4 个案例、4 个问题的展现形式, 以揭示新能源经构网柔直送出系统中常规交流保护面临的问题。

案例 1: 2021 年 11 月 26—27 日, 西北网调组织相关单位在陕北新能源基地 330 kV 尖樊线进行了 2 次人工短路试验。试验线路全长 22.86 km, 尖山、樊学两站分别接入 77.5 万、39.85 万 kW 风电, 短路试验点距离尖山变约 9.4 km(线路全长的 41%)。试验结果表明, 樊学变弱电源侧受过渡电阻放大效应的影响, 测量阻抗超出了接地距离 I 段范围, 存在拒动现象。

案例 2: 当新能源经柔直孤岛送出时, 受新能源和柔直系统控制策略影响, 新能源和柔直侧所提供的正序电流相位均出现受控偏移, 其正序电压、电流相位偏差与常规电源相比存在较大差异, 导致传统比相式距离保护存在正向拒动及反向误动风险^[44]。如东海上风电经柔直接入华东电网 500 kV 系统, 仿真试验结果显示, 在 500 kV 交流线路柔直侧出口距离保护正方向发生相间故障时, 受柔直系统负序电流抑制和低压穿越控制影响, 正序电流的相位出现受控偏移, 导致距离保护拒动。

案例 3: 故障期间新能源电源提供无功支撑, 电流角度超前电压。因此, 由于新能源电源的灵活

控制, 输出电流角度在 $-90^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 度范围内, 而与交流系统连接的线路电流一般在 $83^{\circ}\sim 89^{\circ}$ 度范围内, 导致两侧电流存在相角差, 与两侧均为交流同步机电源的情况相比, 其差动电流减小、制动电流增大, 导致差动保护的灵敏性下降^[45-46]。当新能源经柔直孤岛送出时, 故障电流可能呈现穿越性特征, 使得差动保护的动作性能进一步恶化, 甚至会出现区内拒动问题。浙江亭山到中埠 220 kV 低频输电工程试验证明, 控制策略以维持功率传送为控制目标时, 会导致穿越性负荷电流占比大, 进而造成差动灵敏性不足甚至拒动。

案例 4: 当换流变进行空载合闸时, 均为星角变和星星变同时进行, 当二者的励磁涌流方向相反时, 换流变大差保护中的励磁涌流有可能出现对称性涌流或降低涌流特征, 使得其二次谐波含量大大降低, 导致二次谐波闭锁判据失效, 进而造成换流变大差保护误动作。2009 年 12 月 3 日, 在云广工程楚雄站极 2 高端换流变压器进行空载合闸试验过程中, 串中断路器 10B2.C 合闸后约 900 ms, 换流变大差保护动作跳开断路器。目前实际工程大多采用二次谐波判据来闭锁励磁涌流时的差动保护, 但当变压器区内发生故障, 且故障电路种的谐波含量很大时, 很可能会闭锁掉差动保护, 进而造成保护拒动^[47], 出现如下问题:

1) 问题 1, 附加阻抗的相位受控制策略影响, 在带过渡电阻故障下距离保护不正确动作风险增加。

以沙戈荒光伏经构网柔直送出系统为例, 距离保护配置如图 4 所示。在光伏侧和构网柔直侧距离保护装置的测量阻抗可表示为:

$$\begin{cases} Z_{PV} = \frac{U_{PV}}{I_{PV}} = Z_{LPV} + (1 + \frac{I_{MMC}}{I_{PV}})R_g \\ Z_{MMC} = \frac{U_{MMC}}{I_{MMC}} = Z_{LMMC} + (1 + \frac{I_{PV}}{I_{MMC}})R_g \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z_{PV} 、 Z_{MMC} 分别为光伏、构网柔直侧测量阻抗; U_{PV} 、 U_{MMC} 、 I_{PV} 、 I_{MMC} 分别为光伏、构网柔直侧电压、电流; Z_{LPV} 、 Z_{LMMC} 分别为光伏与构网柔直侧真实故障阻抗; R_g 为过渡电阻。

由于附加阻抗与两侧换流器馈出电流比相关, 且两侧均为可控电力电子换流器, 而其故障后不同控制目标、不同穿越方式下的短路电流比值不同, 因此距离保护不正确动作的风险大幅提升。

2) 问题 2, 零序电流相位受控, 正序电压极化式距离保护零序补偿出现问题。

在单相接地故障(以 AG 为例), 正序电压极化式距离保护的比相结果可表示为:

$$\arg\left(\frac{U_{op}}{U_p}\right) = \arg(Z_m - Z_{set}) - \arg(U_{A1}) + \arg(I_{A1} + I_{A2} + \frac{Z_0}{Z_1}I_{A0}) \quad (9)$$

式中: $\arg(\cdot)$ 为取相角函数; U_{op} 、 U_p 分别为工作电压与极化电压; Z_m 、 Z_{set} 分别为测量阻抗与整定阻抗; U_{A1} 、 I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} 分别为正序电压与正、负、零序电流; Z_0 、 Z_1 分别为线路零序与正序整定阻抗。

在常规新能源交流并网系统中, 由于零序电流的相位箝位效果, 因此接地继电器在金属性单相接地故障下的动作性能较好, 区内故障比相结果约为 180° 、区外故障下比相结果约为 0° , 可靠性较高。然而, 在新能源柔直构网送出系统中, 由于零序分流系数近似实数, 因此两侧保护安装处的零序电流均与故障点处零序电流保持相同相位。但是在单相接地故障下, 由于故障点处的零序电流等于故障点处的负序电流, 且故障点处的负序电流受构网柔直侧负序电流限制表现为幅值有限、相角受控的特点, 因此接地继电器的可靠性会有所下降, 如图 5 所示。

3) 问题 3, 穿越性电流导致比例制动型电流差动保护存在区内拒动风险。

比例制动型电流差动保护的判据形式为:

$$\left| \underbrace{I_M + I_N}_{I_{op}} \right| \geq K_{res} \left| \underbrace{I_M - I_N}_{I_{res}} \right| \quad (10)$$

式中: I_M 、 I_N 分别为被保护线路 MN 两侧电流; K_{res} 为制动系数; I_{op} 、 I_{res} 分别为动作电流与制动电流。

当新能源出力较大, 构网柔直侧负序电流限幅值较小时, 差电流相角处于 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 区间, 会造成比例制动型电流差动保护出现区内拒动问题, 如图 6 所示。当新能源出力为 2 000 MW 时, 区内中点发生 A 相接地故障, 构网柔直负序电流限幅值为 0.5 倍额定值时, 电流差动保护可以正确动作; 而当构网柔直的负序电流限幅值调整为 0.2 倍额定值时, 则会出现区内拒动问题。

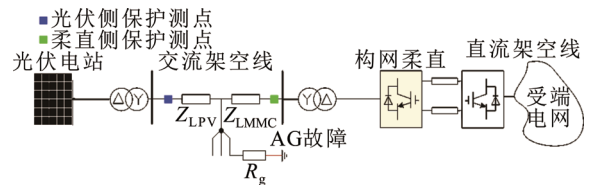


图 4 距离保护配置图

Fig 4 Diagram of distance relay configuration

4) 问题 4, 序分流系数受控制策略、控制参数影响较大, 方向与选相元件可靠性降低。

以序分量选相元件为例进行说明, 序分量选相元件是利用保护安装处正、负、零序电流故障分量之间的幅值、相位关系构造的选相元件。然而, 由于新能源采取负序电流抑制策略, 构网柔直侧采取负序电压抑制策略, 因此流入故障点的各序电流在不同故障类型下所满足的特点幅值和相位关系会被打破, 造成选相元件不再适用。序分量选相流程是通过综合比较不同故障电流序分量之间的相位与幅值关系来进行故障选相的元件, 其判别系数计算式^[48]为:

$$\begin{cases} \alpha = \arg(I_{m0}/I_{m2}) \\ \beta = \arg(\Delta I_{m1}/I_{m2}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_{m0} 、 I_{m2} 分别为本侧零序电流与负序电流; ΔI_{m1} 为本侧正序电流突变量。

以图 4 所示系统线路中点处发生 BC 金属性相间短路故障为例, 此时, 选相元件动作情况如图 7 所示。

如图 7 所示, 由于构网柔直侧保护采取负序电压抑制, 该侧保护安装处负序电流不为 0, 当发生两相短路故障时, 如图 7(a)所示, 构网柔直侧保护安装处零序电流幅值为 0, 而负序电流幅值不为 0, 因此判定为两相短路故障, 具体故障相通过系数 β 确定。此时通过计算 β 可知, 其相角约为 257.6° , 因此最终判定为 AB 两相短路故障。上述算例说明, 在新能源柔直构网系统中, 选相元件不再可靠, BC 相间短路故障会被判定为 AB 两相短路故障。而选相元件作为各种保护的辅助判据对各类保护均有较大的影响。例如, 零序过流保护或零序电流差动保护等基于零序分量设计的保护被认为在该系统中具有较好的适用性, 但是由于其天生缺乏选相功能, 因此往往需要配合选相元件共同实现保护功能。当选相元件出现问题时, 零序过流或零序电流差动保护的可靠性也会有所降低。

2.3 一些保护改进技术的探索

接入新能源电源等电力电子设备后, 传统保护原理面临灵敏性下降、可靠性降低, 甚至是误动、拒动等问题。为此, 许多学者在动作定值调整^[49-50]、配合策略优化^[51], 以及辅助判据的引入^[52-53]等方面开展研究, 以期提升现有保护原理的动作性能。

针对新能源接入引起的距离保护误动问题, 文献^[49-50]提出通过适当调整定值来改善距离元件的

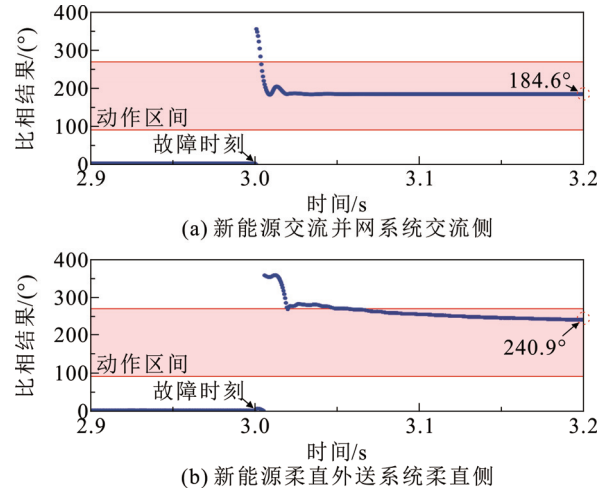


图 5 正序电压极化式距离保护测试结果

Fig.5 Test results of positive-sequence voltage polarization distance protection

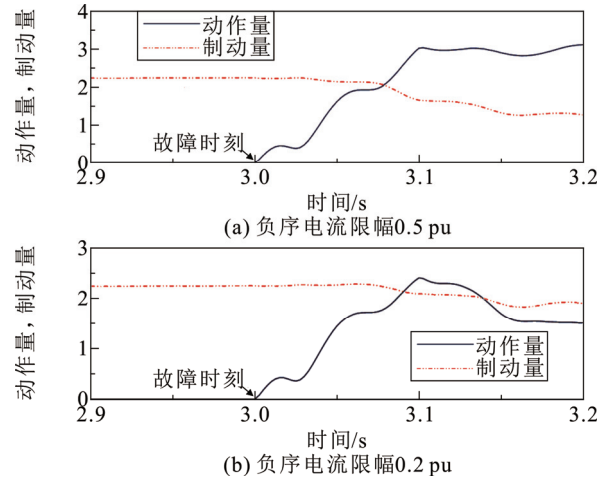


图 6 比例制动型电流差动保护测试结果

Fig.6 Results of the current differential protection

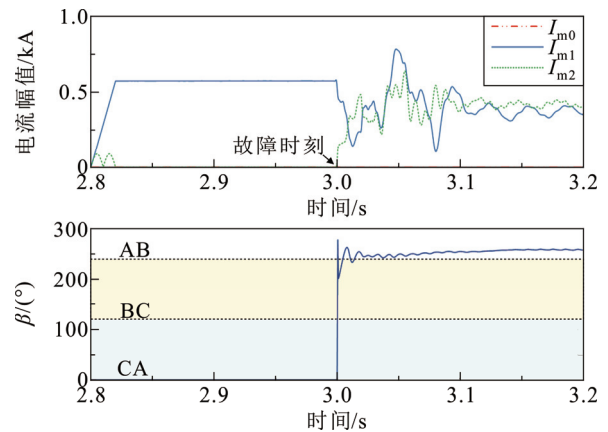


图 7 电流序分量选相元件测试结果

Fig.7 Results of the phase selection components based on current-sequence components

动作性能。然而, 由于新能源系统阻抗复杂多变, 因此所提方法的适应性还有待提升。文献[51]提出将直流 100 Hz 分量保护与交流侧保护协同配合, 从而增强新能源接入下交流线路距离保护和过电流保护的灵敏性。文献[52]提出了基于电力电子电源公共耦合点测量信息的自适应距离保护方法, 通过测量计算得到的分支修正系数对距离保护定值进行辅助修正, 从而提升柔直接入下距离保护的动作性能。文献[53]引入相电压减量判据作为差动保护辅助判据, 显著提升了保护动作的灵敏度。尽管上述研究以特定场景为对象进行保护原理的改进, 提升了传统保护原理在特定场景下的适应性, 但仍存在普适性差、实现复杂度高等不足。

上述研究主要面向工频距离保护、功率方向元件等传统交流保护原理进行定值、判据等方面的改进。为了摆脱新能源电源对动作性能的不利影响, 也有相关研究从原理本身出发, 开展保护新原理的探索。根据原理及特征量的不同, 主要包括行波保护[54-60]、暂态量保护[61-62]、参数识别保护[63-73]和广域保护[74-77]等, 如图 8 所示。

行波保护主要利用电磁波固有传播特征实现故障快速判别[54]。文献[55-56]利用小波变换、形态学等算法提取行波波头, 并据此构建行波差动保护判据。为克服对行波波头准确提取的困难, 文献[57]提出基于行波时-频能谱矩阵相关性分析的单端行波保护, 但采样率要求达到 50 kHz。文献[58]利用故障首行波内包含的信息, 通过检测单端信息计算得到不受过渡电阻影响、不受电源特性干扰的故障距离。文献[59]基于宽频窗短时窗的故障行波信息, 提出了适用于长距离输电线路的新型行波差动保护。文献[60]提出了基于工频分量的行波差动保护, 但动作速度较慢。行波保护原理本身受电源特性的影响较小, 但是存在互感器传变影响大、抗噪声能力较弱等技术难点尚需攻克。

暂态量保护与行波保护在理论依据、实现方法等方面有所互通, 其关键区别在于行波保护主要提取正、反向行波特征, 而暂态量保护重点关注电气量在不同频段下的暂态特性。针对新能源经柔直送出系统的交流侧线路, 部分文献通过 Toeplitz 矩阵变换提取暂态电流信号中的突变特征, 或利用特定频段内的小波能量熵构造区内外故障识别判据, 消除了新能源电源工频故障分量畸变的影响, 但采样频率要求达到 1 MHz[61]。文献[62]提出基于高低频能量比值的保护

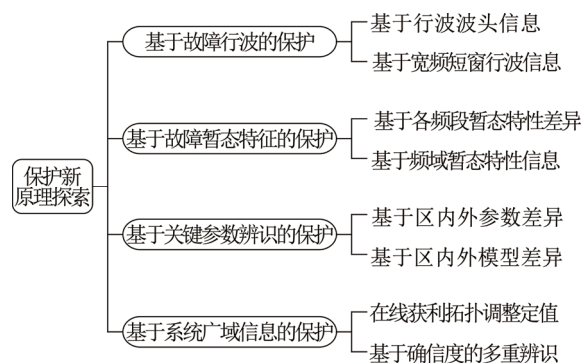


图 8 一些保护改进技术的探索

Fig.8 Exploration of protection improvement techniques

方法, 减小了新能源弱馈特性对保护的影响。暂态量保护利用不同频段下的故障信息进行更为灵敏的判据设计, 但其对采样频率要求较高, 并且由于采用频段信息而非固定频率信息, 因此其保护定值依赖仿真确定, 从而使得定值计算难度大幅提升。

参数识别保护利用故障后的模型、参数特征差异构建故障识别判据[63-64]。针对新能源送出线路保护, 文献[65]充分利用线路阻感模型和电容模型特征构建纵联保护新原理, 以提升保护动作的速度和动作的灵敏性。文献[66]则利用正序阻抗波动差异特性, 构造了适用于大规模双馈风场并网的新型方向元件。针对变压器保护, 在保护判据中引入电压量, 可直接或间接地求取变压器等效模型中的相关参数[67-69], 能够有效地避开铁芯饱和对变压器内部故障甄别的影响。但是, 上述方法仍从工频特征出发构建故障模型, 在区内故障时的等值模型中无法完全剔除背侧电源的影响, 而且工频特征提取算法受电力电子设备谐波影响较大。也有部分学者提出了基于波形相似度或基于奇异值分解的保护新原理, 如: 余弦相似度[70]、Spearman 相似度[71]、基于 Toeplitz 矩阵变换[72]或基于奇异值分解[73]等方法, 该原理利用双侧换流器控制策略及调节速度的差异识别区内、区外故障, 本质上利用了区内外模型的差异性, 可归分至模型误差辨识一类。

广域保护利用全系统多元信息进行故障综合判别[74]。文献[75]提出一种主从式区域纵联保护, 提高了高渗透率分布式电源接入的配网保护动作可靠性。文献[76]提出基于新能源电源和电网拓扑的实时运行信息, 可实现保护定值的自适应在线调整, 显著降低了新能源并网下保护的误动、拒动风险。文献[77]通过分析多重故障支路的故障等效模型, 提出基于故障确信度的多重故障识别方法, 可适用

于运行方式多变的新能源输电系统。广域保护高度依赖测量、通信系统,工程实现难度大、造价成本高,而且算法的数据容错性有待进一步验证和提升。

综上,现有研究针对传统保护原理的改进主要面向特定场景展开,普适性有待提升;而在新原理方面的探索主要通过提高采样频率、增加信息量等手段提升保护性能。在高比例新能源电网覆盖范围广、运行方式多的特点下,需兼顾动作性能要求、采样频率受限、硬件平台固化等因素,提出适应高比例电力电子化系统故障非线性、弱馈流、高谐波特征的高灵敏、高可靠保护原理。

3 多电力电子设备“惯量低、阻尼弱”,系统故障恢复难

3.1 “惯量低、阻尼弱”的内涵

传统交流电网中,同步发电机分布较为密集,系统富含机械惯量,发电机与电网自然同步。即使在故障下,发电机的转子转速也不突变,仍能维持恒定内电势,且能在扰动下自主地支撑电网的稳定性。同步机的惯量与阻尼具体可表示为:

$$\begin{cases} J = \int r^2 dm \\ E = 0.5J\omega^2 \\ T_d = D_p(\omega - \omega_0) \\ P - P_0 = T_d\omega_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: J 为同步机惯量; r 、 m 分别为转动半径与转子质量; E 为转子动能; T_d 为阻尼转矩; D_p 为同步机阻尼; P 、 ω 、 P_0 、 ω_0 分别为同步机有功功率、同步机转速、同步机额定有功功率、同步机额定转速。传统的跟网型换流器例如永磁直驱风机,采用背靠背换流器隔绝风机侧转子频率与电网频率的关系,因此在不额外变更控制策略的前提下,其几乎不具备向电网提供惯量支撑的条件^[78]。同时,跟网型换流器依赖锁相环并网,其反馈控制环节在跟踪电网电压相位时会引入正反馈,从而产生负阻抗,削弱系统阻尼,进而表现出低阻尼特征。以构网型控制中下垂控制为例,其下垂特性可表示为:

$$\begin{cases} K_p = \frac{\omega - \omega_{ref}}{P - P_{ref}} \\ K_q = \frac{U - U_{ref}}{Q - Q_{ref}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_p 、 K_q 分别为有功、无功下垂系数。通过对比式(12)、(13)可知,下垂控制下构网换流器不具备

惯量,但具备一定的与下垂系数相关的阻尼^[79]。在沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统中,各类电力电子设备广泛参与故障演变的全过程,电力电子换流器“惯量低、阻尼弱”影响了系统的故障恢复。但从另一个角度,充分利用电力电子设备高度灵活可控的特点,也是实现保护性能提升、系统安全稳定恢复的全新思路,但相关研究仍处于起步阶段。本文将分别从面向保护性能提升的电力电子化系统控保协同技术及面向系统安全恢复的故障穿越技术 2 个方面进行介绍。

3.2 面向保护性能提升的控保协调技术

电力电子设备高度灵活可控的特点可为故障识别及重合闸等提供思路,在新能源接入的交流电网或柔性直流系统中,已有部分文献提出了主动注入式保护的设想。

在故障识别方面,新能源经交流送出和新能源火电打捆等常规直流送出场景下,新能源逆变器均能够通过主动控制提供有效的故障特征。文献[80]通过改变新能源场站侧的电流相位实现新能源阻抗特征的调整,提升了距离保护、选相元件的性能。文献[81]通过优化正/负序控制环,调节新能源逆变器的输出电流相位,增强了距离保护和方向、选相元件的适用性。文献[82-83]在主动注入谐波频率的基础上,分别提出基于谐波测量的单端量距离保护和基于电流频率差异的差动保护方案。针对柔直接入交流系统,文献[84]通过注入具有特定幅、相特征的负序电流,提高了负序方向元件的适用性。针对海风柔直并网系统的海上侧交流系统,文献[85-86]指出,抑制负序电流的控制策略虽然有助于故障期间直流侧电压保持稳定,但同时降低了不对称故障下的电流幅值。文献[87]提出了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在不对称故障时采用可控注入负序电流的方法,提升了保护识别故障的可靠性。

针对重合闸方面,文献[88-89]利用 MMC 向故障线路注入受控电流以判断故障性质,从而实现柔性直流输电系统的自适应重合闸。文献[90-91]利用混合式直流断路器进行脉冲注入,设计了直流线路自适应重合闸方案。借鉴直流探测式故障识别原理,文献[92]通过 MMC 附加控制向交流故障线路注入电压脉冲信号,实现了自适应重合闸。针对新能源交流送出线路,文献[93]利用风机网侧变流器向送出线注入低电流,实现了主动探测式自适应重合闸。

文献[94]利用统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)向线路主动注入特征电压信号, 实现了三相自适应重合闸。

综上, 现有研究常利用电力电子设备单体的控制优化改变单侧短路电流, 或通过换流器主动注入谐波来实现故障判别。对于大规模高比例电力电子系统, 改变控制不仅会影响故障特性, 还可能影响系统的运行特性和设备的穿越能力; 同时, 不同类型电力电子设备具备多种波形特征、多样注入能力的潜质, 多类型主动注入信号在不同时间尺度、不同空间位置上也存在交互耦合。针对如何通过电力电子化系统继电保护与多类型设备控制协同配合实现故障的可靠灵敏判别, 亟需开展体系化研究和论证。

3.3 面向系统安全恢复的故障穿越技术

大规模新能源经柔直送出时, 送端电网中传统同步旋转电源支撑较弱, 系统故障后的安全稳定风险显著提升。针对该问题, 现有研究主要通过增强换流器的主动惯量支撑能力和优化阻尼特性来提升系统的安全性与稳定性。

在惯量支撑优化方面, 文献[95]提出了一种针对跟网型换流器的惯量增强控制策略, 通过引入惯量控制环节来提升惯量支撑能力。然而, 该方法依赖控制延时实现, 导致瞬态响应性能受限。文献[96]进一步提出虚拟惯量系数优化控制策略; 在此基础上, 文献[97]结合直流侧储能设计了一种惯量协同控制方案, 但频繁调整虚拟惯量参数可能导致控制系统稳定性下降, 从而限制了其工程应用的实际价值。

在阻尼特性优化方面, 文献[98]指出当跟网型换流器阻尼不足时, 易引发高频振荡问题。在弱电网条件下, 这种振荡可能演变为次同步振荡。通过引入分布式调相机等有源阻尼手段, 可以有效抑制高频振荡风险。对于构网型换流器, 若未引入电流内环控制, 则其固有阻尼特性较强, 难以发生高频振荡^[99]。然而, 当引入电流内环后, 系统整体可能表现为负阻尼特性, 从而显著增加高频振荡的风险。缩短控制时延被证明是增强有源阻尼、降低振荡风险的有效措施^[100]。此外, 构网型换流器接入弱电网时, 次同步振荡风险较低; 但在强电网环境下, 随着电网强度的增强和联络阻抗的减小, 系统稳定裕度逐渐降低^[101]。当采用虚拟同步机控制并运行于重载条件下时, 负阻尼转矩可能引发低频振荡。文献[102]表明, 通过适当增大阻尼系数, 可显著缓解该风险。

目前, 已有部分文献对故障后电力电子设备的安全穿越与恢复策略开展了相关研究, 依据设备类型可分为新能源电源单体和多设备联合的穿越控制策略。

针对新能源电源单体, 文献[103]指出随着新能源占比的提高, 其角色已从辅助电源转变为送端电网主导电源, 需从最大功率跟踪为基本控制目标的受控电流源特性向支撑电力系统电压频率稳定的类同步机特性发展。目前, 新能源电源单体在交流/常规直流送出场景下的故障穿越技术已较为成熟。文献[104-105]分别提出了双馈风机的前馈瞬态电流、电感模拟控制方案, 能够有效抑制故障期间的转子过流问题。文献[106-107]针对光伏逆变器的谐波问题, 通过优化电压前馈控制回路增强了穿越性能。在此基础上, 文献[108-109]分析了弱电网下故障期间有功/无功电流等多种因素对新能源并网系统动态稳定性的影响, 提出了改进的低压穿越策略。然而, 对于高比例新能源经柔直送出场景, 送端交流电网频率和电压的调节都依赖于柔直换流站控制, 当发生故障时, 需要新能源电源和柔直换流站协调控制才能实现系统的故障穿越。

针对多设备联合穿越策略, 文献[110-112]利用静态无功补偿器(static var compensator, SVC)、静态无功发生器(static var generator, SVG)、静态同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等无功补偿装置, 通过提出协调无功补偿方案, 增强了新能源机组经交流送出的故障穿越能力。文献[113]利用储能装置的功率平衡能力, 提出了风电机组故障电压穿越自适应协调控制。针对海风经柔直并网场景, 风电机组和送端换流站需协调实现海上侧交流故障穿越功能, 并在故障后迅速恢复系统的正常运行。文献[87]通过 MMC 向海上交流电网注入可控负序电流, 实现了故障清除后系统电压的快速恢复。文献[114]提出了一种基于谐振控制器的过电压抑制策略, 有助于故障切除后电压的平稳恢复。另外, 还有大量文献针对受端交流故障穿越开展了研究, 并指出交流故障期间盈余功率的快速耗散是保证系统故障穿越性能及运行可靠性的主要技术途径, 一般通过优化送端换流站穿越策略实现风电场的迅速平稳减载, 或利用附加直流耗能装置限制直流电压上升^[115-118]。上述研究涉及电力电子设备类型较少, 协同策略实现简单; 对于大规模全电力电子系统, 多类型设备协调优化控制困难, 针对联合故障穿越方案仍需开展系统性研究。

综上,目前新能源交流、直流送出场景下,控保协同研究主要聚焦于新能源控制优化,未考虑跟网型电力电子设备与构网型电力电子设备的配合。在高比例新能源柔直送出场景下,多种类型的电力电子设备及多种类型的保护控制装置在时间尺度、空间层面和多个电压等级间存在深度耦合与交互影响,计及多类型设备动态响应差异、多空间位置、多时间尺度的控制保护协同方法仍需研究。

4 应对挑战的思考与建议

4.1 “主导辨识、降阶融合”——数值计算与解析模型融合迭代

柔直送出下的高比例新能源送端电网属于典型的高比例电力电子化电力系统,系统电压、频率完全由电力电子设备构建,因此故障后,失去同步机支撑作用下的电力电子设备控制非线性响应、电压电流暂态波动特性更加显著。为此,如何构建不同类型电力电子设备在系统不同运行方式下控制非线性响应的等值模型,并实现多电力电子设备时空强耦合影响机理在数学意义上的精确描述,将是电力电子化电力系统故障特性分析与保护原理研究首先要解决的理论基础问题。

在此过程中需要对一些关键问题进行研究。首先,不同的研究目的下,故障响应计算方法的精度要求不同,研究过程中应首先明确对故障响应计算的需求;此外,故障响应特性中的影响因素较多,在不同时间尺度下,影响因素对故障特性影响的主导性存在差异。因此,需要剖析不同时间尺度下不同影响因素的主导性辨识。

此外,如何根据现有新能源交流电网中故障特性研究的基础,充分利用状态空间方程、传递函数、戴维南等值等研究手段,在明确主导性,保留研究所需计算精度的前提下,在非线性问题线性化求解的过程中尽可能降低计算模型的阶数,也是该系统内故障响应计算的关键。

最后,如何根据已有的变压器、线路等时/频域等值模型,结合所建立的电力电子换流器状态空间模型,构建柔直送出下高比例新能源送端电网的全网状态模型,也是需要关注的问题。在此过程中,如何针对系统响应计算结果快速判别多类型电力电子换流器在不同正/负序控制环节的饱和状态,从而实现一次、二次等值模型的融合迭代,将会是研究过程中亟需突破的技术壁垒。由此可见,随着电力

电子换流器渗透率的提升,实现数值计算与解析计算相互融合迭代是解决多电力电子设备“非线性、强耦合”,故障特性算不准的有效路径之一。

4.2 从被保护元件或电源固有的特征出发——实现不依赖与依赖电源特性保护的融合统一

以常规正序电压极化式距离保护为例,对于常规交流系统,其在故障后的电压与电流相位关系与故障后回路的等效阻抗有关,相角差约等于线路的阻抗角。然而,跟网型电源具备低压穿越能力,在故障后会根据并网点电压跌落深度,自适应发出相应的无功电流。因此,故障后电流与电压的相位关系会出现受控偏移。在并网点电压跌落较小时,跟网型电源以有功功率为主,电流与电压相角差很小;随着并网点电压的不断跌落,跟网型电源发出的无功功率不断增加,电流、电压的相角差增大。这一故障特性的差异会导致基于同步机特性设计的常规交流保护适用性降低。综合看来,常规工频量保护性能劣化的根本原因是电源特性发生了改变,保护在原理设计层面需要及时更新合适的“补丁”。

目前,现有研究往往是从被保护元件本身出发,通过规避变流器的非线性时变特性,利用与变流器无关的故障特征设计保护新原理。例如:时域距离保护、综合阻抗纵联、高频保护、行波保护等等。目前,不依赖电源特性的保护往往采取了不依赖工频电源特性的技术思路,通过挖掘区内、区外故障下被保护元件模型差异或某些关键参数差异,来设计提出保护新原理。这类保护原理在柔直送出下的100%大规模新能源送端电网具有很广阔的应用前景。在下一研究阶段,应继续挖掘更多不依赖电源特性的保护新原理。此外,要尽可能提升保护的可靠性。例如:目前的一些时域算法依赖微分算法,抗谐波干扰性不足;一些高频保护利用了高频段内换流器阻抗线性的特点,但是其工程实用性仍需进一步提升。

此外,深入挖掘构网、跟网型换流器电源特性的差异,并基于电源特性差异设计保护新原理,也是一种可行的研究思路。例如:依据故障后双侧电源负序控制策略的差异性,挖掘故障后负序分量的积聚特性的差异,设计方向元件或纵联保护;基于跟网侧、构网柔直侧接入一次设备放电特性的差异,设计纵联保护原理;基于双侧换流器控制响应阶段谐波特征的差异,设计方向元件等。需要说明的是,依赖电源特性的保护原理也是一种可行的技术方

案,但是在此过程中,需要尽可能地降低保护原理对控制参数变化或参数准确的依赖性。由此可见,实现不依赖与依赖电源特性保护的融合统一,是应对多电力电子设备“双弱馈、高谐波”,故障区域辨不明的可行方案之一。

4.3 打破“被动防御”的桎梏、变废为宝——挖掘主动支撑型控保协同技术方案

电力电子换流器具备快速调节内电势与内阻抗的能力,会造成故障分量存在显著差异,同时也为保护性能提升提供了更为主动的改进方案。电力电子设备具备快速响应与构网的能力,通过控制优化协同,可以在保护判别期间重构故障特性,在故障恢复期间提升动态支撑能力。如何在设备安全与电网稳定的双重约束下,准确揭示构网型与跟网型电力电子设备间、不同控制方法与保护原理间的交互作用规律,在此基础上实现单机-场站-柔直在故障下的主动协同支撑,从而提升保护动作性能及系统安全恢复能力,将是电力电子化电力系统新形态下继电保护与故障穿越技术研究的全新思路。

首先,在故障识别阶段,一方面,通过设计附加控制策略或优化穿越控制方式,从保护原理灵敏可靠动作的基本要求出发,计及电力电子设备电压/电流耐受裕度,使电力电子换流器输出对故障辨识友好的故障特性;另一方面,通过换流器主动控制能力,在故障期间构造全新的特征频带,基于所构造的特征频带故障特征,设计故障识别判据,从而主动辨识区内、区外故障。

其次,在故障恢复阶段,充分利用电力电子设备灵活可控的特点,主动注入有利于故障判别的受控信号,为重合闸提供有利故障判别信息,并基于多电力电子设备系统提升重合可靠性,是降低故障后对电力电子设备与系统二次冲击的可行途径。但是在电力电子设备信号注入能力评估、注入式故障全过程判别方法、协调配合的重合闸策略等层面亟需开展系统化的研究。

最后,对于柔直送出下的高比例新能源送端电网,不平衡的功率将会导致交流电压快速变化。虽然新能源具备一定的高、低压穿越能力,但是在快速的电压变化下,新能源脱网风险势必大大提升。需要在更广的空间范围内,结合各换流器不同时间段内的穿越控制行为及控制饱和状态切换,以新能源电源连续运行不脱网、电力电子设备安全运行不损毁为控制目标,提出多电力电子设备在不同时间

尺度下的协同控制策略,从而实现兼顾新能源电源高、低电压穿越以及系统快速安全恢复。

由此可见,通过挖掘主动支撑型控保协同技术的方案,是应对多电力电子设备“惯量低、阻尼弱”,系统故障恢复难的对策之一。

5 结论

本文聚焦沙戈荒大规模可再生能源基地经构网柔直送出系统,从如何精确揭示电网故障特性、如何精准识别故障与非故障工况、如何快速安全恢复系统正常运行等3方面展开分析,归纳总结了继电保护面临的风险与挑战,给出了一些思考和建议:

1) 在故障响应计算方面,应结合不同研究需求,对影响因素进行主导分析,在保留计算精度的情况下,建立不同换流器的状态空间方程,并与一次电路的戴维南等值模型进行融合迭代,从而揭示送端电网的精确故障特性。

2) 针对保护新原理,需要继续挖掘不依赖电源特性的新原理,并结合电源特性提出常规保护原理的性能提升方案,或提出一些基于电源特性差异设计的保护新原理,从而实现故障区域的精确辨识。

3) 针对控保协同技术方案,一方面要优化穿越方案,为继电保护性能提升提供优质的故障特性;另一方面,可以主动注入特征故障信号,以便于保护识别,同时通过电力电子化系统继电保护与多类型设备控制的协同配合实现故障的可靠灵敏判别。

参考文献 References

- [1] 国家能源局. 2024 年 1—10 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2024-11-22]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1310787342.html. National Energy Administration. Statistical data of the national power industry from January to October 2024[EB/OL]. [2024-11-22]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1310787342.html.
- [2] 国家发展改革委. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. [2022-03-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html. National Development and Reform Commission. “14th Five Year Plan” for modern energy system[EB/OL]. [2024-11-22]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html.
- [3] 肖晃庆, 甘慧辰, 黄莹, 等. 远海风电轻量化直流送出技术综述[J/OL]. 高电压技术, 2025; 1-18[2025-01-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241030>. XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025; 1-18[2025-01-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241030>.
- [4] 王渝红, 陈诗昱, 曾琦, 等. 连接无源网络的 MMC-HVDC 系统交流故障穿越附加控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1658-1665. WANG Yuhong, CHEN Shiyu, ZENG Qi, et al. Additional AC fault ride-through control strategy of MMC-HVDC connected to a passive network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1658-1665.

- [5] ALASSI A, BAÑALES S, ELLABBAN O, et al. HVDC transmission: technology review, market trends and future outlook[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112: 530-554.
- [6] 邓文军, 刘麒麟, 张英敏, 等. 张北柔直电网单极接地故障短路电流计算方法及接地策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 4050-4059. DENG Wenjun, LIU Qilin, ZHANG Yingmin, et al. Short circuit current calculation method and grounding strategy of pole-to-ground fault in Zhangbei flexible DC power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 4050-4059.
- [7] 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.
- [8] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. *电网技术*, 2015, 39(9): 2444-2449. KONG Xiangyu, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2444-2449.
- [9] 吴林平, 王小红, 闫冬, 等. 计及继电保护需求的柔直换流器故障分量阻抗重构控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(22): 110-119. WU Linping, WANG Xiaohong, YAN Dong, et al. Control strategy for fault component impedance reconstruction of flexible DC converter considering relay protection requirement[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(22): 110-119.
- [10] WANG X, RUAN X, LIU S, et al. Full feedforward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(12): 3119-3127.
- [11] 许铭铭, 季林, 葛小伟, 等. 计及逆变器侧电流反馈影响的LCL滤波器参数优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4656-4665. XU Jinming, JI Lin, GE Xiaowei, et al. LCL-filter optimization design with consideration of inverter-side current feedback control impacts[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4656-4665.
- [12] JIA K, HOU L Y, LIU Q, et al. Analytical calculation of transient current from an inverter-interfaced renewable energy[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(2): 1554-1563.
- [13] LIU Q, JIA K, YANG B, et al. Analytical model of inverter-interfaced renewable energy sources for power system protection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, 38(2): 1064-1073.
- [14] JIA K, LIU Q, YANG B, et al. Transient fault current analysis of IIR-ESs considering controller saturation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 496-504.
- [15] JIA K, JIANG X Y, ZHANG Y, et al. Fault dynamic response difference-based PLL controller parameter identification of IIR-ESs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(2): 1725-1734.
- [16] 郑涛, 邹芃葢, 王子鸣. 计及锁相环动态响应特性的光伏并网系统故障电流解析计算[J]. *电网技术*, 2022, 46(12): 4656-4667. ZHENG Tao, ZOU Pengying, WANG Ziming. Fault current analysis of photovoltaic grid-connected system considering dynamic response characteristics of PLL[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(12): 4656-4667.
- [17] 徐潜, 王彤, 王增平. 计及锁相环和电流内环暂态过程的逆变器电源故障电流解析方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2603-2612. XU Qian, WANG Tong, WANG Zhenping. Fault current analysis method of inverter-interfaced renewable energy sources with PLL and current inner loop transient processes[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2603-2612.
- [18] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(2): 359-371. XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(2): 359-371.
- [19] 和敬涵, 王语然, 李猛, 等. 基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 4856-4867. HE Jinghan, WANG Yuran, LI Meng, et al. New fault direction identification based on current distortion characteristics in high proportion PV distribution system[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 4856-4867.
- [20] 黄少锋, 高琦, 周宇聪, 等. 消除非周期分量影响的改进傅里叶算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 21-28. HUANG Shaofeng, GAO Qi, ZHOU Yucong, et al. An improved Fourier algorithm for eliminating the influence of an aperiodic component[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 21-28.
- [21] 何佳伟, 魏杰, 戴魏, 等. 模块化多电平矩阵换流器接入下的工频故障特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(21): 49-60. HE Jiawei, WEI Jie, DAI Wei, et al. Analysis of power frequency fault characteristics under integration of modular multilevel matrix converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(21): 49-60.
- [22] 宋国兵, 常鹏, 侯俊杰, 等. 故障分量方向元件在交直流多端馈入系统中的适应性分析[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 136-145. SONG Guobin, CHANG Peng, HOU Junjie, et al. Adaptability analysis of fault component directional component in AC/DC multi-terminal infeed system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 136-145.
- [23] 郑玉平, 吕鹏飞, 李斌, 等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(22): 3-15. ZHENG Yuping, LYU Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(22): 3-15.
- [24] 李明, 常永康, 毛永涛, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. *高电压技术*, 2024, 50(11): 4773-4788. LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(11): 4773-4788.
- [25] JOHNSON B B, DHOPLE S V, HAMADEH A O, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(11): 6124-6138.
- [26] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(4): 795-806. LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding dc microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(4): 795-806.
- [27] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1830-1838.
- [28] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(8): 6002-6015.
- [29] 蔡希鹏, 黄伟煌, 李桂源, 等. 大规模光伏集群经柔性直流构网送出的运行控制技术研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(22): 8734-8745. CAI Xipeng, HUANG Weihuang, LI Guiyuan, et al. Research on operation control strategy of large-scale photovoltaic cluster transmission via grid-forming VSC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8734-8745.
- [30] YE H N, CHEN W, WU H, et al. Enhanced AC fault ride-through control for MMC-integrated system based on active PCC voltage drop[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2023, 11(4): 1316-1330.
- [31] 温志文, 刘昊霖, 贾科, 等. 风电接入海上换流站的交流汇集出

- 线高速保护[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4775-4788.
WEN Zhiwen, LIU Haolin, JIA Ke, et al. High-speed protection of AC collection lines connecting wind power to offshore converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4775-4788.
- [32] 郭铭群, 梅 念, 李 探, 等. ± 500 kV 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204.
GUO Ruiqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of ± 500 kV Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204.
- [33] 温志文. 远海风电并网系统交流线路保护研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
WEN Zhiwen. Research on AC line protection of offshore wind power grid connected system[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [34] 张 兴, 张崇巍. PWM 整流器[J]. 机械工业出版社, 2012: 88-97.
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifier[J]. Machinery Industry Press, 2012: 88-97.
- [35] ZHANG Q, LIU D, CHEN Z. Fault modeling of grid-forming converters using dynamic phasor theory[C]//2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1011-1016.
- [36] 郑黎明, 贾 科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.
- [37] 何佳伟, 周博昊, 李 斌, 等. 柔直构网新能源送端系统故障响应特性计算方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 69-79.
HE Jiawei, ZHOU Bohao, LI Bin, et al. Calculation method for fault response characteristics of renewable energy sending-end flexible DC grid-forming transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 69-79.
- [38] 宫一品. 海上风电经柔直送出系统送端交流故障分析及协调控制[D]. 济南: 山东大学, 2023.
GONG Yipin. Analysis and coordinated control of AC faults at the transmission end of offshore wind power through flexible straight transmission system[D]. Jinan, China: Shandong University, 2023.
- [39] 陆秋瑜, 郑建平, 杨银国, 等. 含构网型 MMC 的受端电网暂态稳定解析分析方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 69-77.
LU Qiuyu, ZHENG Jianping, YANG Yinguo, et al. Analytical method for transient stability of receiving power system with grid-forming MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 69-77.
- [40] AWAL M A, CEN S, RACHI M R K, et al. Modeling, analysis, and design for small-signal stability in sequence-decomposed grid-forming control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 865-875.
- [41] 郑 涛, 陈 颖, 李紫肖, 等. 计及控制切换延时及电压跌落检测影响的逆变型新能源电源故障暂态电流解析计算[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-12[2025-01-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232202>.
ZHENG Tao, CHEN Ying, LI Zixiao, et al. Analytical calculation of fault transient current of IIREG considering the effects of control switching delay and voltage drop detection[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-12[2025-01-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232202>.
- [42] 冀肖彤, 柳 丹, 肖 繁, 等. 基于无功电流波形相关性的逆变型电源电站送出故障方向判别原理[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4816-4826.
JI Xiaotong, LIU Dan, XIAO Fan, et al. Principle of fault direction identification for the outgoing line of inverter power station based on the correlation of reactive current waveforms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4816-4826.
- [43] 范小红, 孙士云, 张雪娟, 等. 双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 18-27.
FAN Xiaohong, SUN Shiyun, ZHANG Xuejuan, et al. Study on the influence of short-circuit current characteristics of a doubly-fed wind farm on distance protection and protection strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 18-27.
- [44] 李 斌, 周博昊, 何佳伟, 等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16-24.
LI Bin, ZHOU Bohao, HE Jiawei, et al. Applicability analysis of distance protection with positive-sequence voltage polarization for transmission lines of wind farm with direct-driven turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 16-24.
- [45] 张海玉, 刘 闯, 晁 勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [46] 钟 显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.
- [47] 张晓宇, 郑 超, 莫品豪, 等. 换流变压器阀侧接地故障分析及保护优化[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 172-178.
ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Analysis and protection optimization of grounded fault in valve side of converter transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 172-178.
- [48] 李一泉, 屠卿瑞, 陈桥平, 等. 大型光伏电站对送出线路保护选相元件的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2976-2982.
LI Yiquan, TU Qingrui, CHEN Qiaoping, et al. Influence of large-scale photovoltaic power plant on phase-selection elements of line protections[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2976-2982.
- [49] 徐 妍, 陆广香, 徐晓敏, 等. 关于工频变化量距离保护可靠性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 51-57.
XU Yan, LU Guangxiang, XU Xiaomin, et al. Research on the reliability of the distance protection using power frequency variable components[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 51-57.
- [50] HOOSHYAR A, IRAVANI R. A new directional element for microgrid protection[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6862-6876.
- [51] 黄 宁, 范春菊, 姜 山, 等. 基于直流 100 Hz 分量的交直流保护配合方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4150-4159.
HUANG Ning, FAN Chunju, JIANG Shan, et al. Coordination method between AC and DC protections based on DC side 100 Hz component[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4150-4159.
- [52] 王 鹤, 刘宇超, 李国庆, 等. 接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 7-13.
WANG He, LIU Yuchao, LI Guoqing, et al. Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 7-13.
- [53] 李 勇, 时伯年, 谢 俊, 等. 渝鄂柔性直流工程接入对 500 kV 交流线路差动保护影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 149-155.
LI Yong, SHI Bonian, XIE Jun, et al. Influence study of Chongqing-Hubei VSC-HVDC interconnection on 500 kV AC line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 149-155.
- [54] 董新洲, 葛耀中, 贺家李, 等. 输电线路行波保护的现状与展望[J].

- 电力系统自动化, 2000, 24(10): 56-61.
- DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali, et al. Status quo and prospect of travelling waves protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 56-61.
- [55] 白 嘉, 徐玉琴, 田 彬, 等. 基于形态综合算法的行波差动保护方案[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 98-102.
- BAI Jia, XU Yuqin, TIAN Bin, et al. A new scheme of travelling wave differential protection based on morphological integration algorithm[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 98-102.
- [56] YUAN Z, ZHANG C. Studies of an algorithm of high speed travelling wave differential protection for EHV/UHV transmission line[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012: 1-6.
- [57] 邓 丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [58] ZHANG C H, SONG G B, WANG T. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019(34): 2028-2038.
- [59] 雷傲宇, 董新洲. 超/特高压输电线路宽频窗短时窗行波差动保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6826-6835.
- LEI Aoyu, DONG Xinzhou. Wide-frequency and short-time window based traveling wave differential protection method for EHV/UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6826-6835.
- [60] 王 全, 徐习东. 基于行波差动原理的线路保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 86-89.
- WANG quan, XU Xidong. Applied criterion for line protection based on traveling-wave differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 86-89.
- [61] 杨明玉, 赵志强, 姚万业. 基于小波能谱熵的单端量暂态保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 10-14.
- YANG Mingyu, ZHAO Zhiqiang, YAO Wanye. A study of transient protection based on wavelet energy entropy for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 10-14.
- [62] 郑 涛, 宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4616-4629.
- ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Fast Protection Scheme for AC Transmission Lines Based on Ratio of High and Low Frequency Energy of Transient Traveling Waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4629.
- [63] 王育学, 尹项根, 张 哲, 等. 基于参数识别原理的串补线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 98-102, 111.
- WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Distance protection for series compensated lines based on parameter identification principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 98-102, 111.
- [64] 索南加乐, 王增超, 张健康, 等. 基于参数识别的高阻接地距离保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 173-178.
- SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHANG Jiankang, et al. A novel distance protection algorithm for high resistance grounding faults based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 173-178.
- [65] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.
- SONG Guobing, ZHANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [66] 牛伟民, 樊艳芳, 张鑫宇, 等. 基于阻抗幅值波动差异的新型参数识别方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 117-125.
- NIU Weimin, FAN Yanfang, ZHANG Xinyu, et al. Novel parameter identification directional element based on impedance amplitude fluctuation difference[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 117-125.
- [67] TRIPATHY M. Power transformer differential protection using neural network principal component analysis and radial basis function neural network[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(5): 600-611.
- [68] ORILLE-FERNANDEZ A L, GHONAIM N K I, VALENCIA J A. A FIRANN as a differential relay for three phase power transformer protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 215-218.
- [69] 王增平, 高中德, 张 举, 等. 模糊理论在变压器保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998(2): 13-16, 45.
- WANG Zengping, GAO Zhongde, ZHANG Ju, et al. Application of fuzzy set theory in transformer protections[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998(2): 13-16, 45.
- [70] ZHENG L M, JIA K, WU W Q. Cosine similarity based line protection for large scale wind farms part II—the industrial application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 2599-2609.
- [71] JIA K, YANG Z, ZHENG L M. Spearman correlation-based pilot protection for transmission line connected to PMSGs and DFIGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(10): 4532-4544.
- [72] 余 越, 王聪博, 沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5441-5450.
- YU Yue, WANG Congbo, SHA Zhaoyi, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5441-5450.
- [73] ZHENG L M, JIA K, YANG B. Singular value decomposition based pilot protection for transmission lines with converters on both ends[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022(37): 2728-2737.
- [74] 杨 红, 尹项根, 陈 卫, 等. 基于分相电流突变量相位比较的广域继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 1-6.
- YANG Hong, YIN Xianggen, CHEN Wei, et al. Wide area protection based on phase comparison of segregated current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 1-6.
- [75] 丛 伟, 潘贞存, 王成山, 等. 含高渗透率 DG 的配电系统区域纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 81-85.
- CONG Wei, PAN Zhencun, WANG Chengshan, et al. A substation area longitudinal protection (SALP) scheme for distribution system with high DG penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 81-85.
- [76] COFFELE F, BOOTH C, DYŚKO A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 561-568.
- [77] 马 静, 许 冬, 王增平, 等. 基于故障确信度的广域多重故障识别新算法[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 88-93.
- MA Jing, XU Dong, WANG Zengping, et al. A novel wide-area multiple-fault location algorithm based on fault confirming degree[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 88-93.
- [78] 迟永宁, 江炳蔚, 胡家兵, 等. 构网型变流器: 物理本质与特征[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 590-604.
- CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.
- [79] 张明锐, 黎 娜, 杜志超, 等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19.
- ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.
- [80] BANAİMOQADAM A, HOOSHYAR A, AZZOUZ MAHER A. A

- control-based solution for distance protection of lines connected to converter-interfaced sources during asymmetrical faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1455-1466.
- [81] BANAIEMOQADAM A, HOOSHYAR A, AZZOUZ M A. A comprehensive dual current control scheme for inverter-based resources to enable correct operation of protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2715-2729.
- [82] 贾 科, 宣振文, 朱正轩, 等. 光伏直流升压接入系统故障穿越协同控保方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3249-3258.
JIA Ke, XUAN Zhenwen, ZHU Zhengxuan, et al. A coordinated control and active protection for PV DC boosting integration system during FRT[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3249-3258.
- [83] SOLEIMANISARDOO A, KAZEMI K H, ZEINELDIN H H. Differential frequency protection scheme based on off-nominal frequency injections for inverter-based islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2107-2114.
- [84] 梁营玉, 卢正杰, 李武林, 等. 负序方向元件适应性分析及与 MMC-HVDC 控制策略协同配合方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2998-3006.
LIANG Yingyu, LU Zhengjie, LI Wulin, et al. Adaptability analysis of negative sequence directional element and cooperative method with control strategy of MMC-HVDC[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2998-3006.
- [85] ERLICH I, NEUMANN T, SHEWAREGA F, et al. Wind turbine negative sequence current control and its effect on power system protection[C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2013: 1-5.
- [86] NDREKO M, POPOV M, MEER A A V D, et al. The effect of the offshore VSC-HVDC connected wind power plants on the unbalanced faulted behavior of AC transmission systems[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 1-6.
- [87] SHI L, ADAM G, LI R, et al., et al. Control of offshore MMC during asymmetric offshore AC faults for wind power transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1074-1083.
- [88] 王 一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [89] STUMPE M, RUFFING P, WAGNER P, et al. Adaptive single-pole autoreclosing concept with advanced DC fault current control for full-bridge MMC VSC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 321-329.
- [90] ZHANG SH, ZOU G B, LI B W, et al. Fault property identification method and application for MTDC grids with hybrid DC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110(9): 136-143.
- [91] SONG G B, WANG T, HUSSAIN K S T. DC line fault identification based on pulse injection from hybrid HVDC breaker[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019: 1.
- [92] 宋国兵, 王 婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [93] 王 婷, 宋国兵, 张晨浩, 等. 风电场 110 kV 单回送出线主动探测式三相重合闸方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 149-155.
WANG Ting, SONG Guobing, ZHANG Chenhao, et al. Active detection based three-phase auto-reclosing method for 110 kV single outgoing line in wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 149-155.
- [94] 郑 涛, 王赞鹏, 马家璇, 等. 基于特征电压注入的 UPFC 接入线路三相自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 152-158.
ZHENG Tao, WANG Yunpeng, MA Jianxuan, et al. Three-phase adaptive reclosure scheme based on characteristic voltage injection for transmission line equipped with unified power flow controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 152-158.
- [95] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑频率稳定的电力电子电源频率控制参数优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1751-1762.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Frequency Control parameter optimistic method of converter-interfaced generation considering frequency stability[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1751-1762.
- [96] 兰 飞, 潘益丰, 时 萌, 等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 51-59.
LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 51-59.
- [97] 闵 勇, 陈 磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-868.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-868.
- [98] LIU J N, XIA Y H, WEI W, et al. Effect of control damping on small-signal stability of grid-forming VSCs considering interaction between inner and outer loops[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6), 7685-7695.
- [99] ROSSO R, ENGELKEN S, LISERRE M. Robust stability investigation of the interactions among grid-forming and grid-following converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2), 91-1003.
- [100] HARNEFORS L, RAHMAN F, HINKKANEN M, et al. Reference-feedforward power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9), 8878-8881.
- [101] LIAO Y C, WANG X F, LIU F C, et al. Sub-synchronous control interaction in grid-forming VSCs with droop control[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID). Xiamen, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [102] 马钦林, 杨 欢, 屈子森, 等. 改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 269-275.
MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 269-275.
- [103] 韩民晓, 赵正奎, 郑竟宏, 等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1327.
HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, ZHENG Jinghong, et al. Development of dynamic voltage support for power grid with large-scale renewable energy generation[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1309-1327.
- [104] LIANG J Q, QIAO W, HARLEY R G. Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 836-843.
- [105] ZHU D H, ZOU X D, DENG L, et al. Inductance-emulating control for DFIG-based wind turbine to ride-through grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8514-8525.
- [106] 顾浩瀚, 蔡 旭, 李 征. 基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 13-19, 31.
GU Haoan, CAI Xu, LI Zheng. LVRT control strategy based on improved grid-voltage feed-forward for photovoltaic station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 13-19, 31.
- [107] 陈 波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.

CHEN Bo, ZHU Xiaodong, ZHU Lingzhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.

- [108] PEI J X, YAO J, LIU R K, et al. Characteristic analysis and risk assessment for voltage-frequency coupled transient instability of large-scale grid-connected renewable energy plants during LVRT[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5515-5530.
- [109] LIU R K, YAO J, WANG X W, et al. Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 303-318.
- [110] 周明, 葛江北, 郭飞, 等. 改善连锁脱网的风电场群电压无功紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 71-77.
ZHOU Ming, GE Jiangbei, GUO Fei, et al. Voltage and reactive power emergency control strategy of wind farm cluster against cascading trip-off[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 71-77.
- [111] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 16-23, 180.
LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 16-23, 180.
- [112] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 23-28.
WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Reactive power and voltage control strategy for wind farm based on STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 23-28.
- [113] 陈浔俊, 耿光超, 江全元. 基于储能的风电机组故障电压穿越自适应协调控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 158-165.
CHEN Xunjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Adaptive coordinated control of fault voltage ride-through for wind turbine based on energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 158-165.
- [114] WANG X H, YANG W B, SHI Z H, et al. Resonant based overvoltage restraining strategy for MMC-HVDC wind power transmission system under sending end grid fault[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chongqing, China: IEEE, 2021: 63-68.
- [115] 陈鹤林, 徐政, 唐庚, 等. 海上风电场 MMC-HVDC 并网系统暂态行为分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 112-118.
CHEN Helin, XU Zheng, TANG Geng, et al. Transient behavior of analysis of offshore wind farm integration system with MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 112-118.
- [116] HU X B, LIANG J, ROGERS D J, et al. Power flow and power reduction control using variable frequency of offshore AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3897-3905.
- [117] 张浩博, 向往, 文劲宇. 应对受端交流故障的海上风电柔直并网系统主动能量控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4600-4614.
ZHANG Haobo, XIANG Wang, WEN Jingyu. Active energy control of offshore wind power MMC-HVDC system to handle ac faults of receiving-end power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4600-4614.
- [118] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97, 400.
XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97, 400.



LI Yan
Ph.D., Professor



ZHOU Bohao
Ph.D. candidate
Corresponding author



HE Jiawei
Ph.D.
Associate professor



CAO Runbin
Ph.D.
Senior engineer



ZHENG Tao
Ph.D.
Associate professor

李岩

1973—, 男, 博士, 教授级高工
主要从事高压、特高压、柔性直流输电领域的控制保护研发、系统集成设计和系统调试工作
E-mail: liyan@csg.cn

周博昊(通信作者)

1996—, 男, 博士生
主要研究方向为高渗透率电力电子化系统控制与保护技术
E-mail: zhoubohao@tju.edu.cn

何佳伟

1991—, 男, 博士, 副研究员, 硕导
主要研究方向为柔性直流电网保护控制、新能源电力系统继电保护等
E-mail: hejiawei_tju@126.com

曹润彬

1986—, 女, 博士, 高工
主要研究方向为直流输电与电力电子化系统控制保护
E-mail: caorb@csg.com

郑涛

1977—, 男, 博士, 副研究员, 硕导
主要研究方向为电力线载波通信、微电网的保护与控制等
E-mail: tzheng@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2024-10-25 修回日期 2025-01-23 编辑 何秋萍