

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.01.013

基于储能型 UPQC 新能源直连系统构网与电能质量 协同控制方法

周灵芳

(宁夏隆基宁光仪表股份有限公司, 银川 750021)

摘要: 新能源直接为用电负荷供电能够节省电力设备建设成本,并提高电能利用效率。但是,当新能源脱离大电网独立运行时,由于缺乏大电网的支撑,存在系统频率、电压波动性强等问题,影响供电可靠性。针对这一问题,本文研究了一种结合储能装置的 UPQC 拓扑及其控制方法。首先,分析系统拓扑及电能质量问题;其次,阐述所提出的融合控制方法,并联部分实现构网控制与光伏的最大功率跟踪,串联部分负责进行电能质量治理;该控制方法能够根据新能源发电情况自主调节,同时实现对电压波动等电能质量问题的治理。最后,通过仿真对所提控制策略的有效性进行了验证。

关键词: 高比例新能源; 构网控制; 协同控制; 虚拟同步机控制; 电能质量治理

A Coordinated Control Method for Grid-forming and Power Quality in Renewable Energy Direct Supply Systems Based on Energy Storage UPQC

ZHOU Lingfang

(Ningxia Longji Ningguang Instrument Co., Ltd., Yinchuan 750021, China)

Abstract: Direct power supply from renewable energy sources to electrical loads can not only reduce the construction costs of power equipment, but also improve power utilization efficiency. However, in case of disconnection from the main grid and independent operation, such problems as strong fluctuation of system frequency and voltage due to the lack of the support of the main grid are existed, and power supply reliability is thereby affected. To address this issue, in this paper a unified power quality conditioner (UPQC) topology integrated with an energy storage device and its corresponding control method are studied. First, the issues of system topology and power quality are analyzed. Then, the proposed integrated control method is described. The parallel part achieves grid-forming control and the maximum power tracking of photovoltaic systems, and the series part is responsible for power quality management. The control method can make self adjustment in accordance with power generation of renewable energy and, at the same time, achieve the management of such power quality issues as voltage fluctuation. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation.

Keywords: high-penetration renewable energy; grid-forming control; coordinated control; virtual synchronous generator control; power quality management

0 引言

在全球能源转型^[1-3]与双碳战略的推动下^[4],光伏发电将逐步成为新型电力系统的重要组成部分^[5],光伏直连用电场景作为一种新能源的利用方式。然而,由于光伏发电具有随机性和波动性的特征,接

入电力系统会引起电能质量问题,给系统安全带来挑战^[6-7]。同时,光伏等新能源通过电力电子设备^[8-10]接入电网,这类设备缺乏传统同步发电机的惯性^[11-12]与阻尼支持,可能影响供电可靠性^[13-15]。这些问题会对工业生产中的高敏感负载,如精密仪器、自动化生产线等造成不良影响^[16-17]。

为解决上述问题,目前采用统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC), UPQC 可通过调节电气参数来改善系统稳定性。文献[18-19]提出在 UPQC 的公共直流母线上增加储能装置,可以较低成本提升系统的调控能力。但在高比例新能源接入时,该方案在故障期间的暂态支撑能力有限,且控制复杂、成本较高。

为使新能源系统具备同步发电机相同的惯量和阻尼特性,采用构网控制^[13,14,20]技术进行功率调节。文献[21]根据电网电压不平衡问题,建立了虚拟同步机模型并提出了相应控制策略,但该方法结构复杂,控制精度与响应速度受限。

为了解决上述矛盾,本文将虚拟同步机控制技术与带储能的 UPQC 相结合,提出一种融合构网控制与电能质量治理的综合控制策略。首先,分析系统拓扑及电能质量问题;其次,阐述所提出的融合控制方法,并联部分实现构网控制与光伏的最大功率跟踪,串联部分负责进行电能质量治理;最后通过仿真验证所提策略的有效性。

1 构网支撑与电能质量治理拓扑与调制

针对新能源场站直连用电场景,提出的附加储能环节的构网支撑与电能质量治理拓扑及控制架构如图 1 所示。

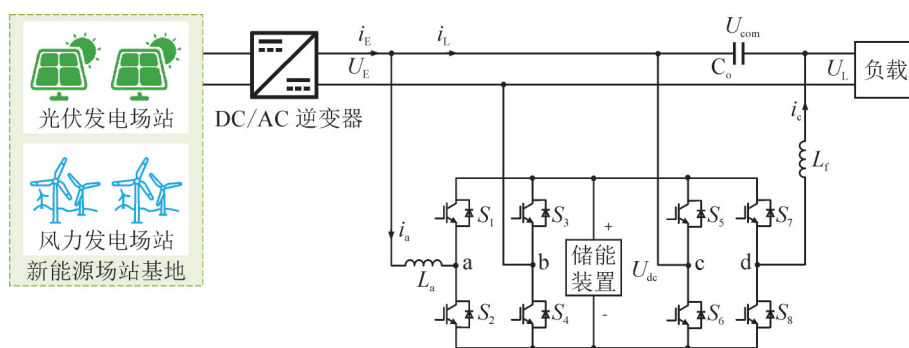


图1 新能源场站直连用电场景下构网支撑与电能质量治理拓扑

Fig. 1 Topology for grid-forming support and power quality management in directly connected renewable energy station scenarios

新能源场站基地输出的电能经 DC/AC 逆变器后进行汇集,通过提出的拓扑结构供给终端用电负荷。其中,拓扑基主要由串联变换器(c相、d相)、并联变换器(a相、b相)^[22]、直流母线及储能装置、串联滤波器(L_r)、并联滤波器(L_a)组成。

1.1 拓扑数学模型

新能源的最大功率跟踪控制是根据外界不同环境参数控制新能源场站中的变换器,从而实现新能源基地的最大功率输出^[23-29]。为了保证交流母线上的电压的稳定传输,采用构网与电能质量治理拓扑进行优化分析。

1) 新能源侧构网控制

为实现光伏场站的最大功率点跟踪与交流汇集母线电压稳定的协同控制,系统通过储能装置对场站交流汇集点实施构网控制,以建立稳定的电压幅值与频率参考。当外界新能源资源充足时,在维持母线电压稳定之外,盈余电能经由并联变换器对储能系统进行充电,实现能量暂存与功率平衡。

2) 负载侧电能质量治理

考虑到实际运行中线路阻抗引起的压降与损

耗,为满足高敏感负荷的电能质量要求,系统在交流汇集母线构网电压基准的基础上,利用储能装置通过串联变换器进行动态电压补偿。该串联补偿机制可有效抑制电压暂降、波动,从而保障负荷侧供电品质。

1.2 拓扑数学模型

1.2.1 新能源场站等效数学模型

1) 光伏场站数学模型

光伏电池的发电原理是光生伏特效应, $U-I$ 特性^[30-31]公式为

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{q(U_{PV} + I_{PV}R_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{U_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: R_s 、 R_{sh} 分别表示等效串联阻抗以及并联阻抗; T 为电池温度; q 为电子电量; A 为无量纲的任意曲线的拟合常数; k 为波尔兹曼常数; I_{ph} 和 I_d 分别表示光生电流和流过二极管的反向饱和漏电流,均会随着环境的光照强度和稳定变换。

2) 风力发电数学模型

风电机组的出力依赖于风速的垂直分布特性^[32-33]。采用幂律公式将参考高度处的实测风速换算至轮毂高度,公式为

$$v(z_h) = v(z_r) \left(\frac{z_h}{z_r} \right)^\lambda \quad (2)$$

式中: $v(z_h)$ 为轮毂高度处的风速; $v(z_r)$ 为参考高度的实测风速, 轮毂高度处的风速; λ 为风切变指数。

风力发电机组的输出功率与风速分布、机组高度等参数相关, 功率特性可以表示为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ P_R \cdot \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_R, & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_R 为额定装机容量; v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别代表切入、额定以及切出风速。

1.2.2 构网支撑与电能质量治理拓扑等效数学模型

所提拓扑中, 利用基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL)可以得到串联变换器基于开关函数的数学模型为

$$\begin{cases} L_r \frac{di_c(t)}{dt} = U_{com}(t) - S U_{dc}(t) \\ C_{a2} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = S i_c(t) \end{cases} \quad (4)$$

并联变换器的连续平均数学模型同理。

1.3 电压偏差及补偿

由于采用虚拟同步机可以构建基准电压与相角, 因此, 当电压暂降时, 通过串联变换器的电容实现与构建电压同相的电压补偿, 向量图如图2所示。

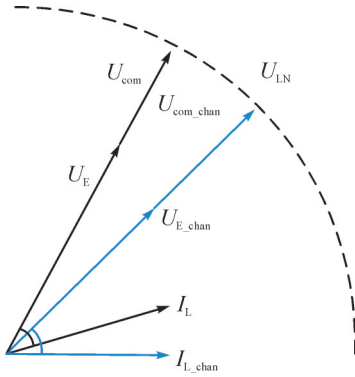


图2 电压偏移补偿向量图
Fig. 2 Voltage offset compensation vector diagram

图中的圆弧表示负载额定电压轨迹, 构网电压由 U_E 跌落至 U_{E_chan} 后, 发生了幅值以及相位的跳变。串联变换器的输出补偿电压由 U_{com} 变为 U_{com_chan} , 经补偿后幅值恢复到额定值。

2 构网支撑与电能质量治理的协同控制

针对高比例新能源接入下直连用电场景, 为了

能够使基于电力电子装备的高比例光伏具有与同步机相似的旋转惯性和阻尼特性, 使用虚拟同步机控制对源端进行构网控制。整体控制策略示意图如图3所示。

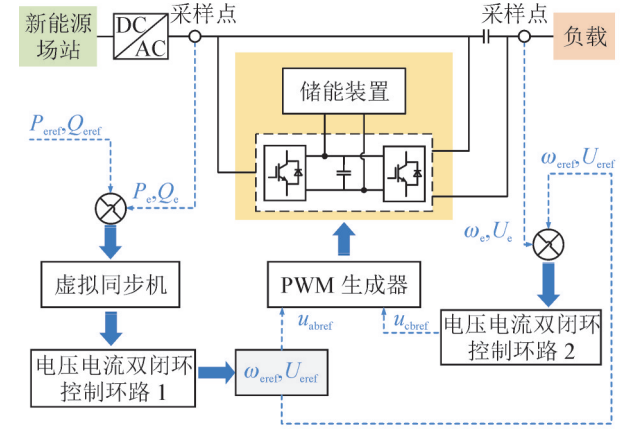


图3 构网支撑与电能质量治理的协同控制框图
Fig. 3 Coordinated control block diagram of grid-forming support and power quality control

2.1 构网控制策略

虚拟同步机控制主要通过模拟摇摆方程特性^[34-37], 实现变流器对系统频率以及电压的支撑功能。控制表达式为

$$\begin{cases} T_m - T_e = \frac{P_{ref}}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} = J \frac{d\omega_v}{dt} + K_d(\omega_v - \omega_0) \\ U_v = U_0 + K_q \int (Q_{ref} - Q_e) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_m 、 T_e 分别为虚拟同步机转矩给定值以及实际输出值; P_{ref} 、 P_e 分别为变流器有功功率参考值以及实际输出值; Q_{ref} 、 Q_e 分别为变流器无功功率参考值以及实际输出值; ω_0 、 U_0 分别为系统的额定频率参考值、额定电压; ω_v 、 U_v 分别是输出的转子角速度以及无功功率控制输出的电压幅值; J 、 K_d 分别是虚拟同步机转子惯量系数以及阻尼系数; K_q 为 Q - U 支路的阻尼系数。

采用 PR 控制器以实现基波频率处的零稳态误差跟踪, 传递函数为

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中: k_p 、 k_r 分别为控制器的比例增益系数以及谐振增益系数; ω_c 为系统的截止频率。

2.2 构网支撑与电能质量治理的协同控制策略

基于上述虚拟同步机、双闭环的传递函数推导, 提出的构网支撑与电能质量治理的协同控制具体控制过程如图4所示。

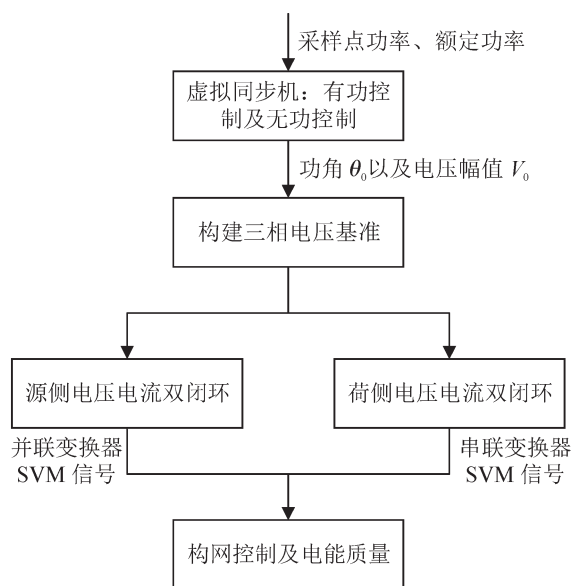


图4 构网支撑与电能质量控制策略

Fig. 4 Control strategy of grid-forming support and power quality

1) 将采样点的信息作为测量值输入虚拟同步机控制中,与额定值比较,进行有功功率控制以及无功功率控制,输出功角 θ_0 以及电压幅值 V_0 。

2) 根据虚拟同步机控制输出的 θ_0 、 V_0 ,可以构建三相电压基准,与源端采样点的数据同时输入电压、电流双闭环控制,生成并联变换器 SVM 的调制信号。

3) 将额定电压负载需求,以及负载侧采样点的测量值同时输入另一组电压、电流双闭环控制,输出串联变换器 SVM 的调制信号,实现构网控制以及电能质量治理。

3 仿真算例分析

为了验证所提出拓扑与控制策略面对不同扰动工况时的有效性和工程可行性,搭建 Matlab/Simulink 仿真模型进行验证。

3.1 不同构网电压基准控制实验

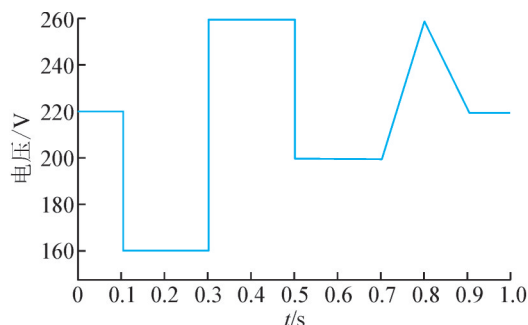
调整构网控制电压基准对所提控制策略进行仿真验证。给定的电压幅值基准、新能源汇集点电压、补偿电压以及负载侧电压如图 5 所示。

根据图 5,当给定的构网电压基准发生变化时,采样点电压可以根据基准实现变化,同时补偿电容对负载端电压进行补偿。根据仿真结果,负载电压可以稳定工作在额定工作点。

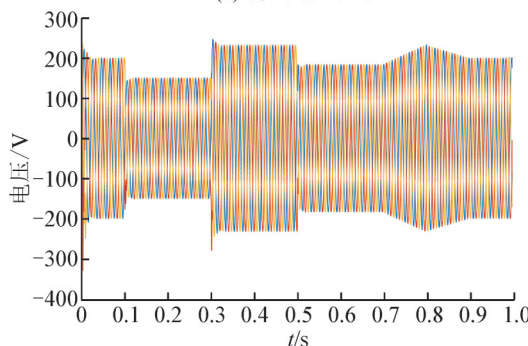
3.2 负载变化实验

考虑终端用电负荷的切出或接入,通过开关实现接入负载变化,对所提控制策略进行仿真验证。

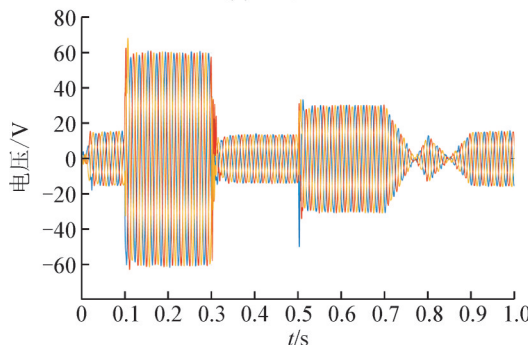
当仿真时间为 0.5 s 时,将额外负载接入电路。仿真结果如图 6 所示。



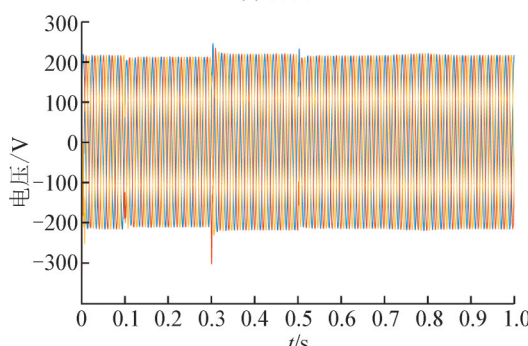
(a) 构网电压基准



(b) 汇集点电压



(c) 补偿电压



(d) 负载电压

图5 不同构网电压基准下仿真结果

Fig. 5 Simulation result under different grid-forming voltage reference

根据图 6 仿真结果所示,负载的变化不会影响构网电压以及负载端总的输出电压,系统依然可以保持稳定,不会影响用户的电能质量。

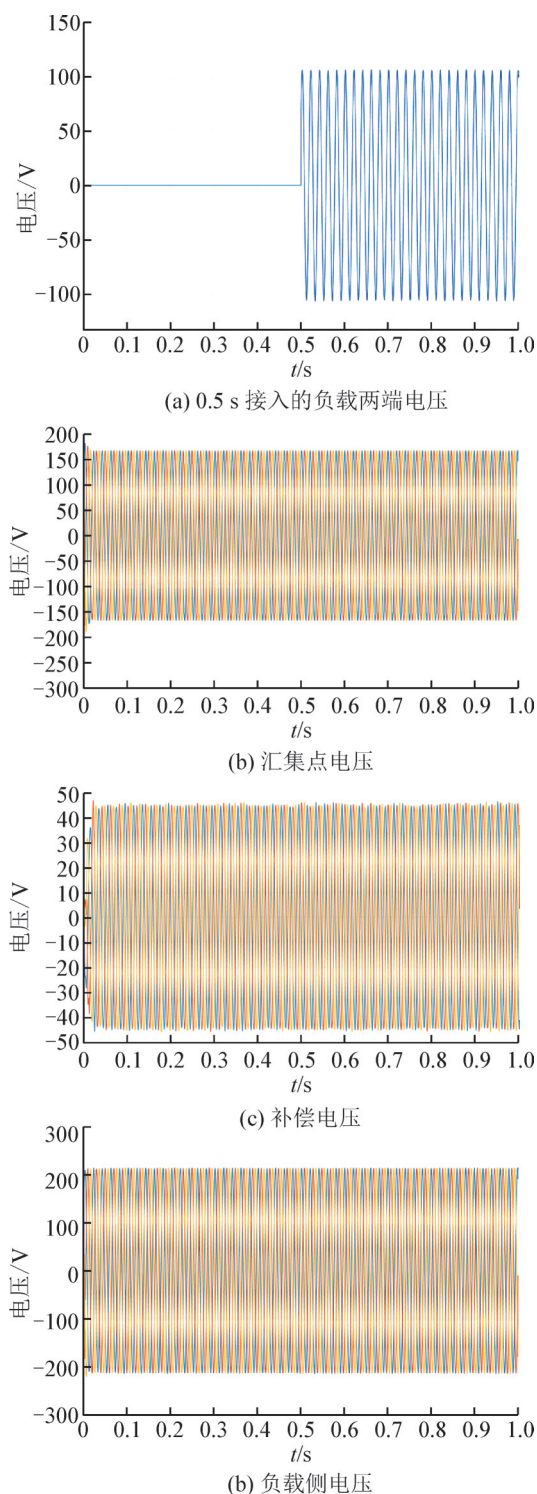


图6 负载变化时仿真结果
Fig. 6 Simulation result in load variation

4 结语

为解决系统惯量低、阻尼弱以及新能源出力间歇性与波动性等问题,本文提出一种基于储能型UPQC的构网与电能质量协同控制策略。该策略适用于风光同场的大规模新能源场站及独立微电网等场景,能够在保障新能源场站最大功率输出的同

时,有效治理负载侧电能质量。本研究对提升新能源消纳能力、减少资源浪费、推动负荷侧绿色能源转型具有显著实践意义,并为新能源的大规模开发与应用提供了有益支撑。

参考文献

- [1] NOOROLLAHI Y, KHATIBI A, ESLAMI S. Replacing natural gas with solar and wind energy to supply the thermal demand of buildings in iran: a simulation approach[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44 101047.
- [2] 张兴,李旭,田杰,等. 构网型储能与调相机的暂态过电压抑制能力对比研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(2):88-95.
ZHANG Xing, LI Xu, TIAN Jie, et al. Comparison of transient overvoltage suppression capability of grid-forming converter and synchronous condenser[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2):88-95.
- [3] 王祺,张泽轲,郭杰帅,等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2):504-516.
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2):504-516.
- [4] 孙银锋,李溶,刘金鑫,等. 大规模光伏电站经柔性直流并网系统故障穿越策略[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2):107-116.
SUN Yinfeng, LI Rong, LIU Jinxin, et al. Fault traversal strategy for large-scale photovoltaic power station via flexible DC grid-connected system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2):107-116.
- [5] 汪自虎,王文天,惠慧,等. 基于近邻成分分析与优化核极限学习机的光伏接入配电网漏电识别[J]. 高压电器, 2024, 60(6):203-211.
WANG Zihu, WANG Wentian, HUI Hui, et al. Leakage recognition method of photovoltaic connected to distribution network based on neighborhood component analysis and optimized kernel extreme learning machine[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6):203-211.
- [6] 邬嘉雨,杨祺铭,丁苒苒,等. 高比例可再生能源配电网两阶段自适应鲁棒弹性提升策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6):174-182.
WU Jiayu, YANG Qiming, DING Ranran, et al. Two stage adaptive robust resilience enhancement strategy for distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6):174-182.
- [7] ZHANG Zhenxiao, NIAN Heng, LI Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 151-159.
- [8] 宫泽旭,艾力西尔·亚尔买买提,辛焕海,等. 新能源电力系统并网设备小扰动稳定分析(二):导出机理与稳定性分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5126-5139.
- GONG Zexu, Ai Li Xi Er - Ya Er Mai Mai Di, XIN Huanhai, et al. Small signal stability analysis of grid-connected equipment in power system (part II): Discussion on mechanism derivation and classification of stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5126-5139.
- [9] 张美清,袁小明,胡家兵. 基于自稳/致稳性的路径级数展开方法及其在含多样化电力电子装备电力系统稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1637-1654.
- ZHANG Meiqing, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Path series expansion method based on self-/en-stabilizing properties and its application in the stability analysis of power systems with diversified power electronic devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1637-1654.
- [10] BECKER J K M, KETTNER A M, PAOLONE M. Harmonic stability analysis of microgrids with converter-interfaced distributed energy resources, part I: modeling and theoretical foundations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(3): 2316-2326.
- [11] 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): 853-867.
- 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): 853-867.
- [12] 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): 1751-1761.
- 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): 1751-1761.
- [13] TOZAK M, TASKIN S, SENGOR I, et al. Modeling and control of grid forming converters: a systematic review[J]. IEEE Access, 2024, 12: 107818-107843.
- [14] 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): 592-606.
- CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 592-606.
- [15] 陈兵,赵崇滨,姜齐荣,等. 用于任意工况变流器阻抗模型黑箱辨识的神经网络设计[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 2-8.
- CHEN Bing, ZHAO Chongbin, et al. A neural network design for black-box identification of converter impedance models in arbitrary operating conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 2-8.
- [16] 徐韵扬,周波,孙昕炜,等. 含SVG的光伏场站阻抗建模与高频振荡风险分析[J]. 四川电力技术, 2024, 47(4): 23-30.
- XU Yunyang, ZHOU Bo, SUN Xinwei, et al. Impedance modeling and risk analysis of high frequency oscillations of photovoltaic stations with static var generator[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2024, 47(4): 23-30.
- [17] 刘佳宁. 高比例风光并网系统稳定机理与功率振荡分析[D]. 杭州:浙江大学.
- [18] 王琦,易俊,刘丽平,等. 基于直流侧储能的新型统一潮流控制器优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4371-4378.
- WANG Qi, YI Jun, LIU Liping, et al. Optimal design of a novel unified power flow controller incorporated with a battery energy storage system at DC side[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4371-4378.
- [19] 黄晓明,范志华,苗世洪,等. 含储能单元的统一电能质量调节器功率协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3390-3398.
- HUANG Xiaoming, FAN Zhihua, MIAO Shihong, et al. Coordinated power control strategy of unified power quality conditioner with energy storage unit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3390-3398.
- [20] 袁小明,张美清,迟永宁,等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904-1916.
- YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1916.
- [21] 年珩,教焜宗,孙丹. 基于虚拟同步机的并网逆变器不平衡电压灵活补偿策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 123-129.
- NIAN Hang, JIAO Yingzong, SUN Dan. Flexible compensation strategy of unbalanced voltage for grid-connected inverter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 123-129.
- [22] 孟令辉,舒泽亮,闫晗,等. 基于特征次谐波补偿的单相统一电能质量调节器并联变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(24): 5125-5133.
- MENG Linghui, SHU Zeliang, YAN Han, et al. Control strategy for single-phase unified power quality conditioner of parallel converter based on specific order harmonics compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical So-

- ciety, 2020, 35(24): 5125-5133.
- [23]王书征,李沛林,杨军炜,等.改进巴氏距离算法下混合级联直流输电纵联阻抗保护优化[J].西安工程大学学报,2024,38(2):9-17.
- WANG Shuzheng, LI Peilin, YANG Junwei, et al. Optimization of longitudinal impedance protection for hybrid cascaded HVDC transmission under improved Bhattacharyya distance algorithm[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(2): 9-17.
- [24]胡传芳,张忠山,陈敏.电化学储能技术在电力系统中的应用现状[J].电池,2025,55(2):382-388.
- HU Chuanfang, ZHANG Zhongshan, CHEN Min. Application status of electrochemical energy storage in new power system[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(2): 382-388.
- [25]蔡阳,刘子瑞,黄颖茜,等.相变蓄热对光伏相变复合围护结构隔热及发电性能的影响[J].西安工程大学学报,2024,38(5):117-125.
- CAI Yang, LIU Zirui, HUANG Yingxi, et al. Effect of phase change heat storage on thermal insulation and power generation performance of photovoltaic phase change composite envelope structure[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(5): 117-125.
- [26]谭景辉,康智慧.光伏发电锂离子电池储能系统能量均衡综述[J].电池,2025,55(5):1193-1199.
- TAN Jinghui, KANG Zhihui. Review on energy balancing of Li-ion battery energy storage systems for photovoltaic power generation[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(5): 1193-1199.
- [27]李爱武,邸亮,董杰,等.考虑源荷双重不确定性的综合能源系统规划优化[J].西安工程大学学报,2024,38(5):77-85.
- LI Aiwu, DI Liang, DONG Jie, et al. Efficient planning and optimization of integrated energy system considering double uncertainty of source and load[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(5): 77-85.
- [28]杨葆鑫,邢文奇,刘鹏飞,等.基于直流电压前馈的构网型光伏稳定性优化控制策略[J].高压电器,2024,60(12):213-222.
- YANG Baoxin, XING Wenqi, LIU Pengfei, et al. Optimal control strategy of stability for grid-forming photovoltaic based on DC voltage feedforward[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 213-222.
- [29]陈君,王博士,肖媛,等.基于Informer模型的短期光伏发电功率预测[J].西安工程大学学报,2025,39(4):82-88.
- CHEN Jun, WANG Boshi, XIAO Yuan, et al. Short-term photovoltaic power forecasting based on the Informer model[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2025, 39(4): 82-88.
- [30]林果,马文闯,程玉洲,等.两级三相光伏并网逆变器研究策略[J].电工技术,2023(16):92-98.
- LIN Guo, MA Wenchuang, CHENG Yuzhou, et al. Research strategy of two-stage three-phase photovoltaic Grid-Connected inverter[J]. Electric Engineering, 2023(16): 92-98.
- [31]张鑫灏,周泓宇,姚伟,等.面向电网电压主动支撑的光伏场站双模式协调控制[J].电网技术,2025,49(9):3577-3588.
- ZHANG Xinhao, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Dual-mode coordinated control strategy of photovoltaic stations for active grid voltage support[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3577-3588.
- [32]罗继东,邹梦丽,侯宝华,等.考虑V2G及碳排放量的风光储综合能源系统协调优化运行[J].电测与仪表,2024,61(6):20-25.
- LUO Jidong, ZOU Mengli, HOU Baohua, et al. Coordinated and optimal operation of wind-solar-battery integrated energy system considering V2G and carbon emission[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 20-25.
- [33]郭尚文.含大规模风电光伏的弱送端系统电压特性分析及优化控制[D].北京:华北电力大学,2022.
- [34]刘旭,张国驹,裴玮,等.构网型变流器的现状与发展趋势[J].太阳能学报,2024,45(9):101-111.
- LIU Xu, ZHANG Guojun, PEI Wei, et al. Current status and development trends of grid type converters[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(9): 101-111.
- [35]马银林,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.
- [36]殷桂梁,董浩,代亚超,等.光伏微网中虚拟同步发电机参数自适应控制策略[J].电网技术,2020,44(1):192-199.
- YIN Guiliang, DONG Hao, DAI Yachao, et al. Adaptive control strategy of VSG parameters in photovoltaic microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 192-199.
- [37]徐鹏,王潇潇,赵伟,等.计及下垂特性的换流器静态传输功率极限分析[J].电网与清洁能源,2024,40(11):1-8.
- XU Peng, WANG Xiaoxiao, ZHAO Wei, et al. An analysis of the static transmission power limit of converters with droop characteristics taken into account[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(11): 1-8.

作者简介:

周灵芳(1985—),女,主要从事电能表硬件设计、过程质量管理等工作。专注海外硬件设计工作,主导产品全流程研发,从需求拆解、原理图绘制、PCB板布线到样品可靠性验证全过程管理。E-mail:18801096352@163.com。