

石化行业绿电消纳电能质量问题优化研究

汪世明

中国石油玉门油田公司, 甘肃 玉门 735200

Optimization Seminar on Power Quality Problems in New Energy Power Consumption of Petrochemical Enterprises

WANG ShiMing

PetroChina Yumen Oilfield Company, Yumen, Gansu 735200

ABSTRACT: With the steady progress of the national “carbon neutral” and “carbon peak” strategic planning, various energy and related industries have taken the lead in new energy power generation layout, “green power” application, new energy industry chain layout and other areas. The layout of new energy industry chain and other areas, technology research and development and application in the field of new energy has made rapid progress and breakthroughs. Petrochemical enterprises have special power quality requirements in “green power consumption”, due to their inherently high energy consumption, high-risk process media, key production equipment for primary power loads, and high level of self-control. How to combine the application of “green power” with the high-quality development of petrochemical enterprises is one of the important issues facing petrochemical enterprises today. This paper takes solar power generation as an example, analyses and explores the typical problems of petrochemical enterprises in “green power consumption”, and systematically elaborates the solutions and measures for petrochemical enterprises to deal with the power quality problems, so as to discuss and explore the optimisation solutions for the application of new energy power in the petrochemical industry.

KEY WORDS: petrochemical enterprises; “green power” consumption; power quality

摘要: 随着国家“碳中和”“碳达峰”战略规划的稳步推进,各能源及相关行业率先涉足的新能源发电布局、“绿电”应用、新能源产业链布局等领域,在新能源领域技术研发和应用有了日新月异的进展和突破。石化企业因其固有的能耗量大、工艺介质高危、关键重点生产设备为一级用电负荷、自控水平高等客观因素,使得对“绿电消纳”中电能质量有与众不同的要求。如何把“绿电”应用和石化企业高质量发展科学结合起来,是当今石化企业面临的重要课题之一。本文以太阳能发电为例,就石化企业在“绿电消纳”中对存在的典型问题予以剖析和研究,通过系统阐述石化企业应对电能质量问题的方案措施,抛砖引玉,

讨论研究出新能源电力在石化行业应用优化方案。

文关键词: 石化企业; “绿电”消纳; 电能质量

引言

随着国家层面对“双碳战略”的布局和新能源电力建设的稳步推进,新能源代替传统能源已是大势所趋,“绿电”也已从曾经的热词,实实在在的走到我们面前,“绿电”替代、“绿电”消纳已从民用走向工业,从低端走向高质量发展应用。作为能耗大户的石化企业,如何将产品的转型升级和新能源应用优化结合,是企业未来能否安、稳、长、满、优生产经营所要面对的重要任务之一,石化行业用能的固有特点和新能源电力固有特性的结合和优化至关重要。

1 绿色电能概述

随着国家层面“碳达峰”“碳中和”战略的部署推进,光伏发电、风力发电等新能源的开发应用已成大势所趋,预计2040年新能源电力将达到总电能50%份额,随着新能源电力消纳在汽车、化工、制造等各行业各领域的推广使用,新型电力系统与传统用电企业接口的高质量优化融合势在必行。当前,大部分石化企业所使用的电能均由燃煤机组及化石能源提供,其主要优点是电能连续性强、质量可靠,其缺点主要是碳排放量大、消耗大量化石能源。光伏发电是未来常常采用的“绿电模式”,装机容量已初具规模,将是石化企业用能不可或缺的存在。

2 光伏电力系统的基本构成

光伏电力系统由光伏组件、直流汇流排、直流配电柜,DC-AC逆变器、交流配电柜、升压变压

器、计量监测装置、继电保护及自动装置、储能电池等组成。光伏电力系统按照构架形式可分为并网型光伏电力系统和局域型光伏电力系统。并网型光伏电力系统工作原理是太阳能通过光伏组件的光电效应产生直流电能，经过 DC-AC 逆变器转换，将直流电调制成 50Hz 的正弦波交流电后，通过变压器升压并如电网供用户使用，通常电压等级高、容量大、传输距离远，其系统结构如图 1。域型光伏电力系统是把逆变后的交流电直接供用户使用，电压等级相对低、容量小、就地使用，其系统结构如图 2。

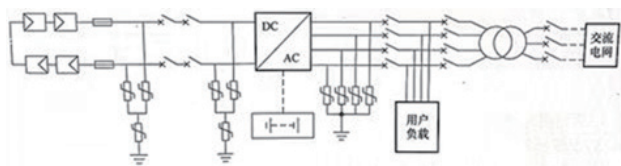


图 1 光伏并网型电力系统结构简图

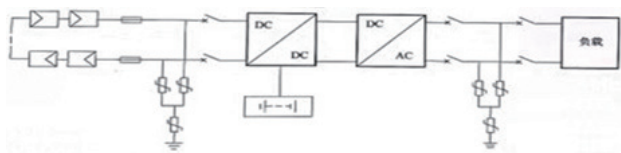


图 2 光伏局域型电力系统结构简图

3 电力系统的电能质量

电能质量主要是指电压质量，即电压幅值、频率和波形的质量；其主要内容包括电、频率偏差、三相电压不平衡、电压波动与闪变、电压暂降与短时电压中断、供电中形畸变、暂时和瞬态过电压等因素，发生时间 $5\mu\text{s}$ 到数分钟，典型电压幅值各有不同要求。供电频率由电力系统电源工作特性所决定，当电源与用电负荷间出现有功功率不平衡时，电力系统频率就会发生变动，造成频率偏差，偏差的大小及其持续时间取决于负荷特性和电源控制系统对变化的响应能力，国家标准 GB/T 15945-2008《电能质量 电力系统偏差》要求，电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，当系统容量较小时，偏差值可为 0.5Hz 。理想的电能质量是恒定频率、恒定幅值的正弦波形电压与连续供电。规模化生产的变压器、开关柜等变配电设备，电动机、照明等用电设备的额定工作条件也是以此标准设计、制造和使用，电能质量问题不仅会影响到这些设备的正常运行，还会影响到这些设备的使用寿命，偏差越大影响越加剧烈，更有甚者会给石化企业等一级以上负荷用户造成巨大财产损失，乃至危

害人员生命。

3.1 光伏电力系统的基本特点

光伏电力系统与传统火电、水电、核电系统相比较，其可再生、无污染、无“三废”的优点给社会能源合理利用、环境保护、电能补充等方面优势显著。同时，该系统因自身固有特性也存在一些需要进一步提升的空间。

3.1.1 光伏电力系统的电压波动

电压波动是指电压均方根值的变动或连续改变。应用实际中，常常把谐波以外的电压波动、短时中断、电压瞬降、频率偏差等纳入到电压波动范畴。某企业光伏并网后电流波形如图 3。

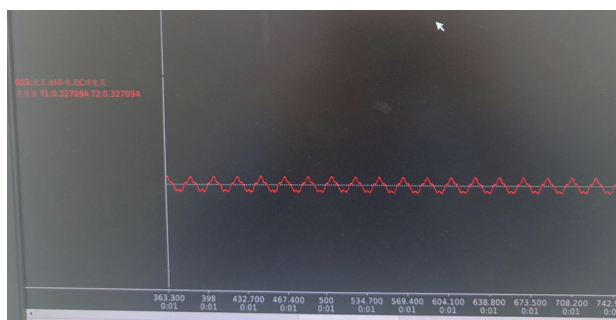


图 3 某企业光伏并网后电流波形图

1) 电压波动的主要原因

a. 光伏电力系统发生短路故障。越是靠近电源，短路阻抗越小，短路容量越大，电压波动幅值越大，因继电保护及自动装置动作时限短，故而电力持续时间较短，通常在 10ms 以上。电力系统异常时，光伏逆变器的脱网断路器分闸时间为 $0.1 \sim 2.0\text{s}$ 、连续运行为 $2.0 \sim 0.05\text{s}$ 。

b. 重型负载或大型电动机启动。其影响范围和大小主要取决于负载启动容量与电源容量的比，比值越小影响越低；与启动方式也关系密切，软启动方式对电力系统冲击最小；与负载的固有启动特性有关，方波型启动特性冲击小、启动时间长，脉冲型负载启动时间短，冲击大。影响时间为负载完成启动所需要时间，通常数秒到数十秒不等，如某石化企业三机组主风机采用电阻降压启动需要 45s 。

c. 光伏电源与电网电源切换。为确保电力系统安全，不同源电源切换时，通常采用先切故障电源再投备用电源的控制逻辑，该控制切换完成时间取决于切换装置在电网中的位置和切换系统固有动作时间，例如根据直流侧电压和电网条件实现自动投运需要 $30 \sim 300\text{s}$ 。

d. 光伏电源工作不稳定。光伏发电系统的功

率输出受日照、气候、季节、温度、海拔等因素影响，例如太阳能电池组件功率温度系数、开路电压温度系数、短路电流温度系数，随温度变化 $-0.42 \sim 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ 间不等，年累积功率衰减 $2\% \sim 20\%$ ，逐年递增态势，使得输出功率不平稳，在用电侧负载不变条件下系统电压波动，波动幅值主要取决于光伏发电的容量、输出电压的稳定能力以及负载相对于电源容量的大小，当输出功率变化越大、负载需量越高时，电压波动越明显，电压幅值异常时光伏电源系统持续供电时间仅为 $0.5 \sim 10\text{s}$ 。

e. 在系统频率异常等情况下，光伏储能逆变系统脱网运行、放电状态、充电运行间的相互状态切换需要约 0.2s 。

2) 电压波动的主要影响

a. 高低压变配电设备工作异常，绝缘击穿，降低使用寿命。

b. 电动机运行偏离额定工况，引发关键机组振动、轴位移等连锁停机，造成连续性生产装置非计划停工。

c. 照明系统工作异常，对电压敏感型光源会影响使用寿命。

d. 无功补偿装置不能正常投用或频繁投切，用电侧功率因数不达标。

e. 计量不准确，继电保护及自动装置误动。

f. 石化企业“晃电”造成大面积非计划停工，甚至造成火灾爆炸等灾难性事故，后果不堪想象。

g. 在光伏发电系统输出功率降低期间，石化企业需要降低加工量或停产，影响企业经营效益。

3.1.2 光伏电力系统的谐波

波形理想状态为正弦波形，实际工况中，电压波形都存在不同程度的畸变，对全波形进行傅里叶级数分解，就可得到不同频率波，按照分解频率与工频频率的倍数不同，分为基波（工频波）、偶次谐波、奇次谐波、间波。

1) 谐波产生的主要原因

光伏电源系统中逆变器的核心部件是可控硅，由于可控硅的导通截止电的非线性特性，就会产生高频电流，导致谐波的产生。常见的谐波源有光伏电源逆变器和非线性电气设备等，逆变器谐波输出率取决于逆变器脉动数、逆变器导通控制角、逆变器控制形式等，其总电流谐波率 $\leq 3\%$ 。

2) 谐波对公用电网和其他系统的危害

a. 使变压器、线路、电容器等设备过电压，使

变压器局部严重过热、绝缘老化、寿命缩短，乃至于损坏，3次谐波会使系统中性线点过热断路。

b. 对电动机、照明等产生谐波损耗，降低设备效率和寿命，电动机组还会产生机械振动和噪声，影响设备正常运行或连锁停机。某企业光伏并网后机组振动波形如图4。

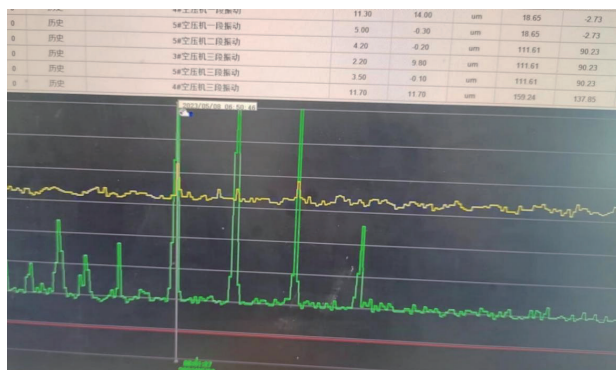


图4 某企业光伏并网后机组振动波形

c. 电力系统局部并联或串联谐振放大，引起设备损毁等严重事故。

d. 继电保护和自动装置误动作，电气计量、监测不准确。

e. 对石化企业通信系统产生噪声干扰，影响通讯质量，甚至使企业DCS、SIS、GDS、环保在线监控等系统误动引发非计划停工、危险废物无序排放、政策性处罚、操作人员慌乱等。

3.1.4 无功需求大

随着光伏电力系统容量增加，逆变器的功率因数 ≥ 0.99 的特性不容忽视，电力系统有功功率需求波动大时，无功功率需求量大且变化速率快，需要额外的无功来维持系统电压稳定。

3.1.5 孤岛现象

在电网失压时，光伏发电系统将进入孤岛运行模式，电压和频率不受电力系统控制，不仅会造成石化企业设备损坏，还会威胁检修人员人身安全，造成重合闸操作失败等。

4 石化企业的“绿电”消纳

石化企业既是当地经济支柱产业，也是重要电力需要大用户，在当地经济社会发展中起着重要作用。绿色能源的在这些企业的应用，是新型电力系统构建的关键任务之一。

4.1 石化企业对电能质量的要求

石化企业作为化石燃料的再加工企业，用电设备大部分属于一、二级负荷，用电设备对电力系统的可靠性、安全性有严格的要求，要求采用双回

路供电模式,企业变配电系统通常采用双电源进线单母线分段运行方式,必须符合 GB-T14549 和 IEEE519 中总电压谐波畸变率、总电流谐波率占比低于 5% 等电能质量要求。电力系统电能质量问题造成石化企业大面积停电事件多发,常见的电能质量事件有系统电压突降,造成低压电动机大面积停车,造成生产中断或次生火灾爆炸事故;电网故障,保护固有动作时间内的失压,造成电动机大面积停车;谐波引起机组振动停车,造成石化企业 SIS 连锁动作停工等,由此可见,因新型电力构架下的电能质量问题,是当前造成石化企业非计划停工的重要因素之一。新能源发电存在的间歇性、随机性、波动性问题和极端气象条件下更多灵活性电力系统容量调动,是保障石化企业高质量发展需求,助力国家“双碳”目标实现的关键制约因素之一。

4.2 石化企业绿色电能优化策略

4.2.1 提高光伏电力系统可靠

1) 选用绿色整流逆变装置。使用理想化的无谐波污染的绿色变流设备,在电路中添加合适的电感和电容,使得输入、输出电流都是正弦波,输入功率因数可控;内置谐波抑制电抗器,减少谐波污染;采用多阶换流技术,限制谐波电流的流动路径,消除次谐波减少谐波含量;加入滤波器减小噪声信号。

2) 提高光伏电源转换效率。在设备选型中应优选欧洲效率高的逆变器,保证光伏发电系统的转换效率,在当前技术条件下,要求逆变器在额定负载时效率不低于 95%,极端情况下,也要保证 90% (大功率逆变器) 以上。

3) 最大功率点跟踪。太阳能电池输出功率随时变化,要适应光伏发电系统的实际运行状态,及时调整光伏发电系统工作在最大功率点,确保输出功率稳定。

4) 自动可恢复性。过负荷时,要限定输送功率在规定范围内;故障情况,必须自动解列;系统发生扰动,要经过 0.3s 以上延时后再重新并网。

5) 具有完善、可靠保护功能。根据电力系统要求,光伏电源系统应具有电压、电流、频率、反极性、温度等电量、非电量保护功能,在电力系统异常时,及时准确切除故障,确保系统安全可靠运行。

4.2.2 系统接口优化

电源快速无扰动切换。采用双电源自动快速无

扰动切换装置、高速断路器匹配方案,最大限度减小系统切换动作时间到 100ms 以下,自动跟踪切换前电能电力系统冲击最小,解决电力系统发生电能质量差时备用电源无扰动快速投用的问题,确保了供电系统的稳定;优化光伏电源与原有电力系统间调度,最大限度保证系统安全和用户可靠供电。

4.2.3 用电设备平稳运行

1) 加装交流电抗器。有效抑制高次谐波电流,提高输入电源的功率因数,使进线电流的波形畸变大约降低 30% ~ 50%,是不加电抗器谐波电流的 50% 左右。

2) 设置有源滤波器。采用有源电力滤波器从光伏电源中检测出谐波电流,产生一个与该谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流,无谐波放大风险,可使电网电流只含基波分量。

3) 由 L、C、R 元件构成谐波共振回路和光伏电源谐波电流频率相同时,即可阻止谐波流入电网。其优点是投资少、频率高、结构简单、运行可靠及维护方便,缺点是功能易受系统参数的影响,对某些谐波有放大作用、耗费多、体积大。

4) 加装无功补偿装置:对于冲击性负荷,以补偿冲击型无功需求,改善系统功率因数。

5) 单台或个别关键低压电动机的抗电压突降措施。电压突降时,磁力回路电源失电,接触器释放造成低压用电设备停机。根据工艺条件,可对这些电动机采用抗“晃电”模块来完成 0.3~1.5s、步长 0.3s 的失电后来电再启动和来电后延时 0.3~1.5s、步长 0.3s 的来电后延时再启动。

6) 低压电动机群的抗电压突降措施。在磁力启动回路加装延时继电器法、智能分批群启动法、PLC 控制启动法等,其中智能分批群启动法应用较为科学,该方法既包括了 PLC 控制启动法优点又包括了延时继电器法的功能,同时还具有其它方法不具备的电网电压恢复检测、电压突降前电动机运行状态记忆,依据工艺条件实施分批再起失压电机、再起过程中总起电流保护、大电动机群电压瞬降后的再起等功能,较完善的完成了电动机群在“晃电”后的快速再起。

7) 低压母线侧电压突降解决方案。在上下级联络开关处加装无扰动快速切换装置,其切换一般在几十毫秒左右。快速切换装置应用如图 4 所示:

如图 5 所示,低压快速切换装置安装于 0.4kV 侧母联断路器 3DL 处。采集的交流流量主要是开关 1DL、2DL 和 3DL 处的电流及低压 I 母线、II 母线

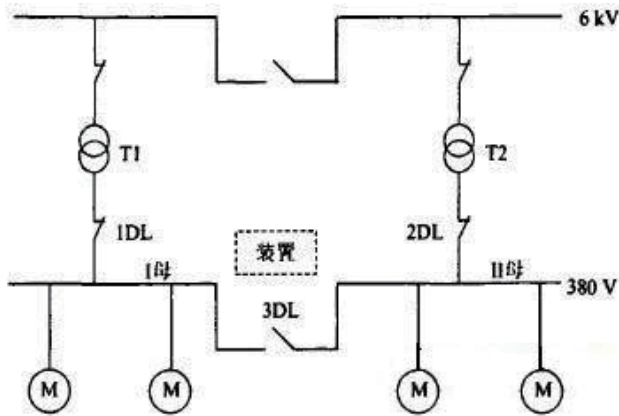


图5 低压快速切换装置的应用

和电源的电压，开入量主要是三个开关的位置及其他在切换逻辑中用到的变位信息。将两个主变的快速保护动作信号接入装置作为快速启动电源切换的判据，也可使用装置自身的电源故障检测逻辑进行启动和闭锁。当主变压器保护装置发出过流保护和轻瓦斯保护的信号时，设定无扰动快速切换装置只发信号，不动作。装置可以根据接入的开关位置触点和电气量，判断出工作电源和备用电源。当检测到工作电源故障时，装置跳开工作开关，确认跳开后，判断是否满足合闸逻辑，满足后合上备用开关，将备用电源投入，确保负荷不断电，生产不中断。

4.2.4 屏蔽干扰源

屏蔽干扰源是抑制干扰的有效的方法。要求通讯信号线路长度尽可能短，一般为20m以内，且信号线采用双芯屏蔽，接地与动力设备接地点不能共地等措施，与电力等线路远离、正交角度跨越、穿钢管等方式完全隔离；在通讯机房、中控室等处可采用屏蔽网等措施，抑制外来干扰；采用屏蔽罩、降低通讯设备本身对外界的干扰。

5 结束语

构建石化企业新能源应用电力系统，需要根据该地区新能源资源禀赋、并网消纳通道建设、负荷需求量和负荷特征有序开发新能源，针对光伏发电存在的谐波、电源切换、电能质量不稳定等，通过应用“抗晃电”模块、快速无扰动切换、有源滤波等技术，确保石化企业一级负荷供电安全可靠，为“绿电”在石化行业的广泛应用探索研究新路径。

参考文献：

[1] 刘屏周. 工业与民用配电设计手册【A】. 中国电力出

版社, 2017, ISBN 978-7-5123-9995-2/TM72-62.

Liu P Z. Industrial and civil power distribution design manual [A]. Power Engineering Press, 2017, ISBN 978-7-5123-9995-2/TM72-62.

[2] 刘宝林. 电气设备选择施工安装设计应用手册【B】. 中国水利水电出版社, 1997, ISBN 7-80124-576-8/TM62.

Liu B L. Electrical equipment selection construction and installation design application manual [B]. China Water Conservancy and Hydropower Press, 1997, ISBN 7-80124-576-8/TM62.

[3] 赵家礼. 电动机修理手册【C】. 机械工业出版社, 1989, ISBN 7-111-01408-1/TM.177.

Zhao J l. Electric motor repair manual [C]. Machinery Industry Press, 1989, ISBN 7-111-01408-1/TM.177.

[4] 刘惠民. 电力工业标准汇编【C】. 中国电力出版社, 1998, ISBN 7-80125-064-8/TM37

Liu H M. Power industry standard compilation [C]. China Electric Power Press, 1998, ISBN 7-80125-064-8/TM37.

[5] 孙忠利, 金京哲, 闫景雷, 等. 中国石油天然气股份有限公司炼化企业电力系统继电保护和安全自动装置配置与整定原则. 2020.

Sun Z l, Jin J Z, Yan J l, et al. Principles of Configuration and Rectification of Relay Protection and Safety Automatic Devices for Power Systems of Refining and Chemical Enterprises of China National Petroleum Corporation. December .2020.

[6] 赵峥, 李明, 田园园, 等. 江苏如东海上海风电柔直工程系统谐振分析与抑制 [J]. 电力建设, 2023, 44(6): 144-152.

ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 144-152.

[7] 徐艳春, 张进, 汪平, 等. 考虑配电网静态电压稳定性的微电网优化配置 [J]. 电力建设, 2022, 43(8): 87-101.

XU Yanchun, ZHANG Jin, WANG Ping, et al. Optimal configuration of microgrid considering static voltage stability of distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8): 87-101.

[8] 张敏, 祗会强, 张世锋, 等. 考虑配电网电能质量改善的分布式光伏优化调度方法 [J]. 电力建设, 2022, 43(10): 147-157.

- ZHANG Min, ZHI Huiqiang, ZHANG Shifeng, et al. Optimal scheduling method for distributed photovoltaic generation in distribution network considering power quality improvement[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 147-157.
- [9] 高娟, 吴润泽, 郝建红, 等. 基于光伏供能的孤岛微电网无线传感网能量调度优化策略 [J]. 电力建设, 2023, 44(4): 119-129.
- GAO Juan, WU Runze, HAO Jianhong, et al. Energy scheduling for solar-powered isolated microgrids with intelligent monitoring based on WSN[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 119-129.
- [10] 李英量, 蔡鹤鸣, 王康, 等. 改善不平衡配电网电压质量的分布式储能序次优化配置方法 [J]. 电力建设, 2022, 43(1): 87-95.
- LI Yingliang, CAI Heming, WANG Kang, et al. Sequence optimal configuration of distributed energy storage for improving voltage quality of unbalanced distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 87-95.
- [11] 于昊正, 赵寒杰, 李科, 等. 计及需求响应的分布式光伏集群承载能力评估 [J]. 电力建设, 2023, 44(2): 122-131.
- YU Haozheng, ZHAO Hanjie, LI Ke, et al. Carrying capacity evaluation of distribution network for distributed photovoltaic cluster considering user-side demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 122-131.
- [12] 张宁, 朱昊, 杨凌霄, 胡存刚. 考虑可再生能源消纳的多能互补虚拟电厂优化调度策略 [J]. 发电技术, 2023, 43(5): 625-633.
- ZHANG Ning, ZHU Hao, YANG Lingxiao, HU Cungang. Optimal Scheduling Strategy of Multi-Energy Complementary Virtual Power Plant Considering Renewable Energy Consumption[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(5): 625-633.
- [13] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 杨夯. 构网型储能变流器及控制策略研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, YANG Hang. Research on Grid-Forming Energy Storage Converters and Control Strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [14] 邓景松, 王英民, 孙迪飞, 等. 逆变型分布式电源接入对就地型馈线保护的影响分析 [J]. 发电技术, 2021, 42(1): 115-121.
- DENG Jingsong, WANG Yingmin, SUN Difei, et al. Research on the Effect of IIDG on Local Feeder Protection[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 115-121.
- [15] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析 [J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
- JIANG Hongli, LIU Yuxi, FENG Yiming, et al. Analysis of Power Generation Technology Trend in 14th Five-Year Plan Under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [16] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 郭金东. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究 [J]. 发电技术, 2023, 43(4): 484-491.
- XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, GUO Jindong. Research on China's Future Energy System and the Realistic Path of Energy Transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(4): 484-491.
- [17] 杨万开, 王兴国, 王书扬. 渝鄂柔性直流输电接入电网高频谐振与抑制分析 [J]. 发电技术, 2022, 43(3): 492-500.
- YANG Wankai, WANG Xingguo, WANG Shuyang. Analysis of High Frequency Resonance and Suppression in Yu to E VSC-HVDC Project Connected to Power Grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 492-500.
- [18] 朱建华, 李振清, 许立长. 基于随机子空间方法的光伏变流器模态识别和分析 [J]. 发电技术, 2021, 42(2): 201-206.
- ZHU J H, LI Z Q, XU L C. Modal Identification and Analysis of Photovoltaic Converter Based on Random Subspace[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 201-206.
- [19] 张桂红, 王琛, 张祥成, 等. 一种适用于直流配电网中半桥-全桥混合型MMC的全电平逼近调制策略 [J]. 电力建设, 2022, 43(6): 75-83.
- ZHANG Guihong, WANG Chen, ZHANG Xiangcheng, et al. A full-level modulation strategy for half bridge-full bridge hybrid MMC in DC distribution grids[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 75-83.
- [20] 刘一民, 王书扬, 李彬, 等. 逆变型新能源场站柔性直流送出系统交流线路差动保护灵敏度优化方案 [J]. 电力建设, 2022, 43(1): 63-69.
- LIU Yimin, WANG Shuyang, LI Bin, et al. Sensitivity optimization scheme of AC line differential protection in MMC-HVDC system of inverter new energy station[J].

- Electric Power Construction, 2022, 43(1): 63–69.
- [21] 彭超逸, 张昆, 胡亚平, 等. 动态监测系统在电力市场环境下的应用 [J]. 发电技术, 2021, 42(5): 595–603.
- PENG Chaoyi, ZHANG Kun, HU Yaping, et al. Application of Dynamic Monitoring System in Electricity Market Environment[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 595–603.
- [22] 刘敏, 崔亚兵, 陈聪, 等. 变电站噪声污染分析及优化控制 [J]. 电力科技与环保, 2019,35(4):1–4.
- LIU Min, CUI Yabing, CHEN Cong, et al. Analysis and optimization control of noise pollution for substations[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2019,35(4):1–4.
- [23] 陆江, 王文彬, 袁廷璧, 等. 光伏电站系统标准能效比的修正方法研究 [J]. 电力科技与环保, 2023, 39(3):194 – 200 .
- LU Jiang, WANG Wenbin, DUAN Zhenqing, et al. Study on Correction Method of CPR of PV Power Station[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023,39(3):194 – 200.
- [24] 童旭. 风电场风能资源分析方法与综合评价 [J]. 电力科技与环保, 2023,39(4):292 –298 .
- TONG Xu. Study of comprehensive evaluation analysis of wind energy resources in wind farm[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023,39(4):292–298.



汪世明

收稿日期: 2023年12月6日。

作者简介:

汪世明(1974), 男, 工学学士, 高级工程师, 中石油炼化板块电气专家组成员, 从事石油化工企业变配电系统技术管理工作。E-mail: wshim@petrochina.com.cn