

高比例新能源配电系统电能质量与储能一体化应用

王 建¹, 李晓庆², 迟恩先¹, 杨姗姗¹, 王德涛¹

(1. 山东华天电气有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 针对分布式新能源接入配电系统带来的电能质量问题, 结合高比例新能源配电系统特点, 研制一种电能质量优化与储能一体化装置, 将电能质量治理与储能合二为一, 解决新能源接入后配电系统引发的各类典型问题, 并在实际应用中进行验证。

关键词: 新能源; 电能质量; 变流器; 储能; 谐振

Integrated application of power quality and energy storage in high proportion new energy distribution system

WANG Jian¹, LI Xiaoqing², CHI Enxian¹, YANG Shanshan¹, WANG Detao¹

1. Shandong Hoteam Electric Co., Ltd., Shandong Jinan 250101, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: This paper aims at the power quality issues caused by the distributed new energy access to the distribution system, and develops an integrated power quality optimization and storage device. This device combines power quality control with energy storage to address various typical new problems caused by the new energy access to the distribution system. The actual application is used for verification.

Keywords: new energy; power quality; converter; energy storage; resonance

0 引言

在国家“双碳”战略推动下, 绿色低碳发展进程加速, 构网型储能的应用和储能系统的部署, 为提升电网对高比例新能源的接纳、配置和调控能力, 实现能源转型和可持续发展提供了重要支撑。随着大量光伏、风电等新能源接入配电系统, 电网面临电压波动、频率偏差等问题, 随之出现新能源出力大幅波动、功率平衡和运行控制难度极大、新能源发电量消纳困难、挤占常规

电源空间以及新能源消纳与安全矛盾等问题。与此同时, 电能质量问题日益凸显, 例如, 并网逆变器中的无源网络导致系统谐振; 新能源接入后对网侧负荷需求降低, 导致功率因数降低等。储能技术能够辅助风能和太阳能等可再生能源大规模接入, 促进多能互补耦合利用, 提高风电、光伏等可再生能源的消纳。有源滤波器主要治理谐波污染, 无功补偿设备仅能改善功率因数。但面对上述实际应用问题, 传统的电能质量治理设备难以应对。高比例新能源接入导致的电能质量问

题成为迫切解决的难题。

1 高比例新能源配电系统电能质量问题

高比例新能源引起的电能质量问题如图1所示。新能源快速发展和高比例接入,改变了源、网、荷潮流方向,当新能源消纳能力不足时,会使末端电压升高。图1a中相电压抬升至258 V,超过额定电压220 V的15%,即超过用电设备上限,造成用电设备损坏,为保护设备安全,需切断新能源并网发电,造成弃风弃光等资源浪费;同时,波动性发电特性会造成电压波动、闪变,影响用电设备的正常工作。分布式光伏,尤其是单相户用光伏发电设备随机接入后,会造成三相电流不平衡,图1b中三相电流不平衡度超过50%。当系统中单相负荷所占比例较大时,若光伏接入相的负荷较小,则该相从电网侧获取的电能将减少,导致供电变压器三相电流不平衡加剧,进而使三相电压不平衡,引起变压器某相过载,造成保护动作或烧毁变压器,降低供电变压器利用率及使用寿命。从电能质量角度看,三相不平衡会引起负荷侧相电压偏移,重负荷所在相电压偏低,轻负荷所在相电压偏高,导致变压器及线路损耗增加。新能源并网逆变器在并网端口设有无源网络,可吸收逆变器的高频开关纹波,避免造成二次污染,但普通并网逆变器因滤波网络参数不合理,逆变器群易存在谐振风险。图1c和图1d为光伏逆变器接入前后系统电压电流情况,接入后系统发生谐振,电压和电流波形出现明显高频振荡,会造成配电系统设备损坏,使逆变器故障率升高。

新能源发电接入后,从外电网获得的有功功率降低,无功功率不变,导致功率因数降低,可能产生力率电费,造成供电变压器利用率低、负荷侧相电压出现偏移、线路及变压器损耗增大等问题。用户的变压器容量为800 kV·A,新能源未接入时的有功功率 P_1 为600 kW,无功功率 Q_1 为200 kvar时,则功率因数为0.95,根据图2所示功率三角形关系图进行计算, S_1 为632.5 kV·A, $\cos\varphi_1$ 为0.95,不被罚款;若新能源接入后发电的

有功功率为500 kW,则系统向网侧需求的有功功率 P_2 降为600 kW-500 kW=100 kW,无功功率 Q_2 仍为200 kvar,此时的功率因数 $\cos\varphi_2$ 为0.45,功率因数过低会导致供电局罚款。该问题主要是因为新能源接入后,网侧需求的有功功率降低导致功率因数降低。新能源接入前后的功率情况见下表。

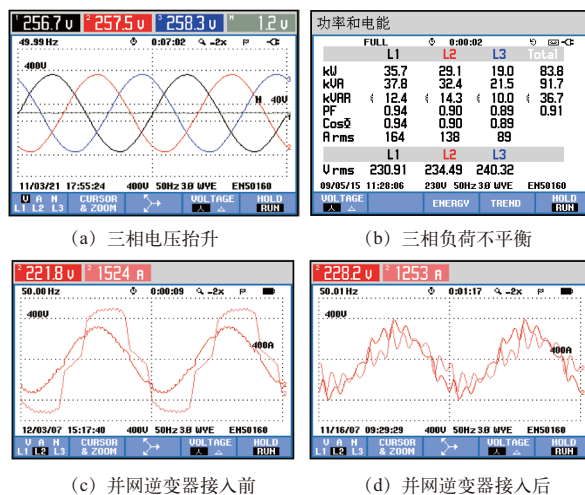


图1 高比例新能源引起的电能质量问题

Fig. 1 Power quality issues caused by a high proportion of new energy sources

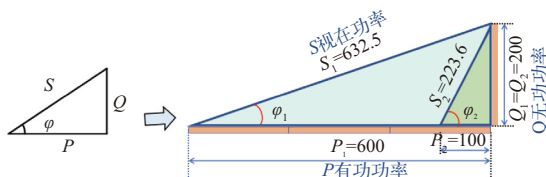


图2 功率三角形关系

Fig. 2 Power triangle relationship

表 新能源接入前后功率情况

Tab. Power situation before and after the integration of new energy

网侧测试 接入前后	有功 功率 /kW	无功 功率 /kvar	视在 功率 /kV·A	功率 因数
新能源接入前	600	200	632.5	0.95
新能源发电功率	500	0		
新能源接入后	100	200	223.6	0.45

2 电能质量优化与储能一体化装置

针对高比例新能源接入后的新问题,需构建储能与电能质量一体化装置,将电能质量控

制与储能有机结合，统一管理配电系统的能量和电能质量。结合电价激励补偿机制，通过合理调配，优先就地消纳系统内能量，光伏等新能源发电优先自用，次之存储，再次之上网。不发电时由电网和储能装置供电，实现利润最大化。在不影响有功交互的情况下，将部分容量用于谐波、无功、电压暂降/暂升、三相不平衡等电能质量问题的综合治理；非有功交互情况下，可全功率进行电能质量问题治理，解决系统的电能质量问题。该装置既能阻挡外网污染，又能防止负荷污染电网，还能兼顾储能，提高新能源发电消纳能力，降低储能成本，改善电能质量，增强配电系统的稳定性和灵活性。

2.1 装置架构设计

电能质量优化与储能一体化装置架构如图3所示，包括本地控制器（MC）、远程运维监控系统（RMM）、变压器、变流器、电池系统、快速切换装置（STS）以及监测端口等，变流器为两组背靠背结构，直流母线并联，接储能的变流器可采用两级架构方式，以兼容不同电压等级的储能系统。

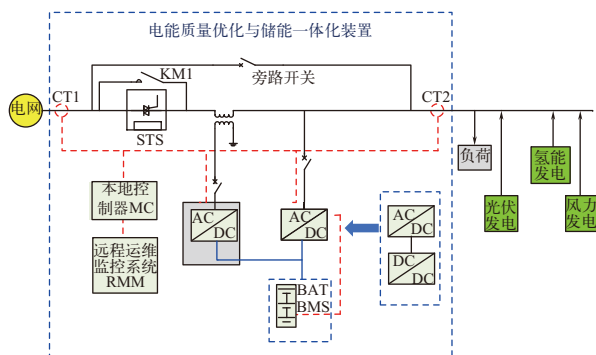


图3 电能质量优化与储能一体化装置架构

Fig. 3 Integrated architecture of power quality optimization and energy storage devices

并网情况下，本地控制器通过远程监控系统优先接收电力调度，控制变流器快速输出有功功率，满足电网的调峰调频需求。通过电网侧电压电流实时检测发电与用电总和，自动跟踪区域负荷变化，根据预设参数控制变流器调整储能或发电功率，保证优先自发自用，提高区

域用电效率；装置根据预设的时间表，按计划进行储能与发电，实现削峰填谷；装置提供快速无功支撑和有功平滑功能，稳定电网电压和频率，降低电网电压波动与闪变，减少弃电，提高并网发电效率。实时检测负荷电压及电流，快速运算分离出负荷的电流、电压等信息，运算后形成相应的电能质量优化指令电流并传至变流器中。变流器按此通信指令控制自身的并网变流器，产生电能质量优化所需的补偿电流，动态精细输出无功电流以补偿电网功率因数及无功支撑，产生反相谐波电流以滤除谐波，产生阻尼效果以抑制谐振，产生负序电流以治理三相不平衡。变压器一次侧串联在系统中，二次侧连接变流器模块的交流侧，实现电气隔离。变压器为高漏感变压器，二次侧短路时，一次电压不会突变。通过检测装置输出端电压，主动调节末端电压。当电网电压波动时，通过变流器输出一个电压正负差值，使装置输出侧的电压稳定在额定值。快速切换装置（STS）实现电网的快速通断，具备孤网运行功能。电网正常情况下，STS导通，装置处于并网状态；当电网停电后，主控快速检测到断电，迅速断开STS，区域转换为微电网供电方式，变流器通过储能电池迅速转换为电压源，为新能源发电设备提供电压支撑，保证区域不间断供电。

2.2 控制系统设计

本地控制器结构如图4所示，由主控制器、通信扩展板、接口扩展模块和显示屏等组成。主控制器负责整机系统逻辑控制、从机指令产生与电量计算，通过高速光纤接口将指令下发至各单元。采用多DSP协同控制，控制准确度高且动态响应速度快，满足储能与电能质量治理的多种控制功能。单元之间采用光纤隔离驱动，抗干扰能力强。通信扩展板承上启下，将主控制器下发的通信及指令信号复制下发至各单元，方便系统扩展，并将从控制器和接口扩展模块回送的数据汇总后回传至主控制器。接口扩展模块负责开入开出接口扩展。显示屏负责与主控制器通信，采集并显示电量、设备工作信息状态、参数设定与修改、历史记录等信息，同

时接受远程运维及电力调度。

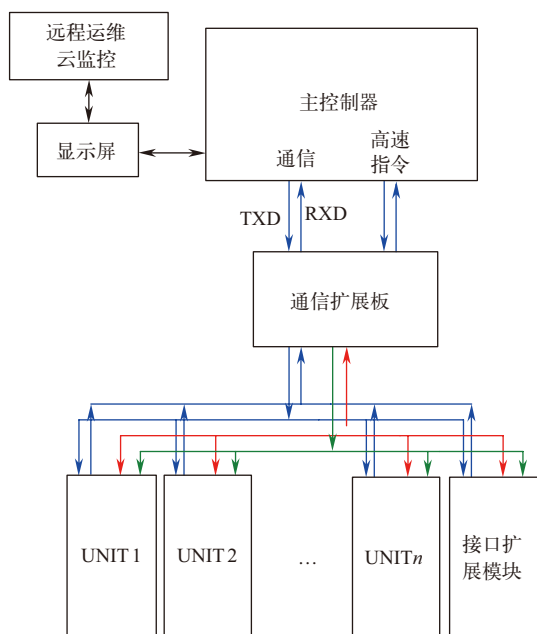


图 4 控制系统结构

Fig. 4 Control system structure

2.3 并网逆变器无源网络导致的谐振抑制仿真

针对并网逆变器接入配电系统中易与系统发生谐振的问题,采用谐振抑制技术。并网逆变器系统如图5所示。

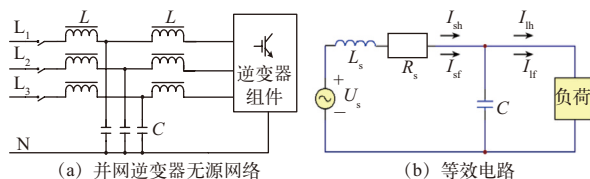


图 5 并网逆变器系统

Fig. 5 Grid connected inverter system

图5a为普通的并网逆变器在逆变器组件与电网接入点之间的LCL无源网络,通过电路等效后(见图5b),电网电压 U_s 、系统电感 L_s 、系统电阻 R_s 和电容 C ,将系统最终等效为电感和电容,系统存在等效的谐振频率 f_0 ;根据公式 $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_s C}$,当配电系统中的谐波与无源网络等效的谐振频率接近或者一致时,系统谐振会放大,造成设备损坏,甚至发生火灾。

通过PSIM仿真软件搭建仿真电路,配置逆变器、 LRC 滤波器和电网参数。对系统阻抗进行仿真分析,增加有源阻尼指令,对谐振频率进行主

动抑制, 主控系统根据检测的信号, 设定电感 L_s 和电容 C 数值, 通过处理器进行运算, 计算出谐振频率 f_0 。通过主动的控制策略, 向系统中注入一个谐振频率 f_0 的有源阻尼指令, 通过变流器生成电流信号并注入系统中。仿真效果如图6所示。可以看出, 谐振抑制开启前, 系统存在谐振的电流波形; 当谐振抑制功能开启后, 系统谐振问题消除。该电路能有效抑制因无源网络导致的谐波放大, 提高并网系统的稳定性。

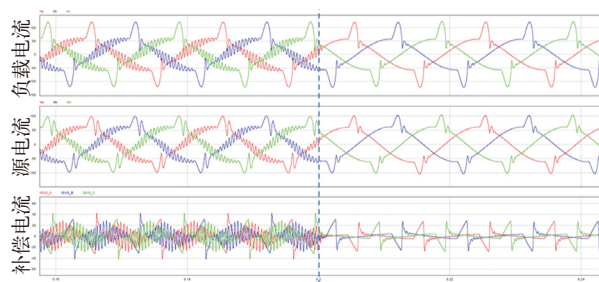


图 6 谐振抑制仿真

Fig. 6 Resonance suppression simulation

3 应用案例

某企业的10 kV/0.4 kV低压配电系统如图7a所示,由分布式光伏发电、变频器类负荷与电容补偿柜等构成。光伏发电接入系统后,原有的电容柜经常过载烧坏电容器,导致每月产生力调电费。光伏发电容量大时,存在能量倒送等一系列电能质量问题。根据企业产线用电负荷波动情况和电能质量状况,安装一套200 kW/200 kW·h的电能质量优化与储能一体化装置,图7b为装置的功率部分,储能电池由客户提供。装置跟踪发电、用电功率,按照计划进行储能与发电,提高末端用户储能与发电收益,为配电系统提供快速无功支撑和有功平滑功能,提高新能源并网电压和频率的稳定性;快速削峰填谷,降低电网电压波动与闪变,减少弃电,提高并网发电效率;进行三相不平衡、无功、谐波、谐振抑制等电能质量的综合治理,降低利率电费,提高用电效率。图7c为余电上网功率和电能图,其基波功率因数 $\cos\varphi$ 为1。如图7d所示,当电网发生电压暂降时,装置负荷提供连续供电,解决企业中因光伏接入

带来的电能质量问题。

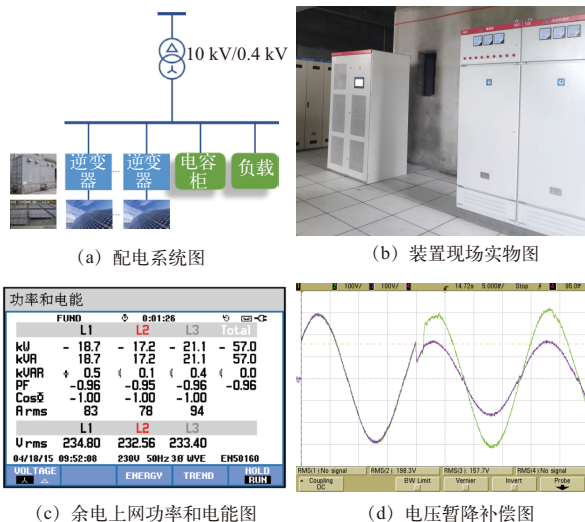


图7 电能质量优化与储能一体化装置实施效果

Fig. 7 Implementation effect of integrated power quality optimization and energy storage device

4 结束语

本文将电能质量优化与储能装置合二为一，并以实际实用案例为依据，全面解决新能源接入后供电系统的各种问题，如末端电压提升、波动、闪变及发电用电设备的谐波污染问题；抑制并网逆变器中的无源网络导致的系统谐振；解决了新能源接入后因对网侧有功需求降低导致的功率因数降低问题，平滑有功功率，提高新能源发电的消纳率，减少弃风弃光现象。通过将电能质量优化、储能削峰填谷与离网备用供电等功能融合，提高装置利用率，降低损耗，减小占用空间，节省用户投资，具有很高的性价比与实用性。

在新能源配电系统方面，高比例新能源配电系统中，电能质量与储能一体化装置与微电网技术、网侧储能、家庭储能、工商业储能、光伏储能融合、云端一体化等技术耦合的优势在于，缓解功率波动，改善电能质量，主动调节潮流和电能质量，在技术、经济性、环保性等方面，更有助于推动新能源的广泛应用和可持续发展，实现绿色低碳的能源转型。

参考文献

- [1] 王佳蕊, 李德鑫, 张家郡, 等. 微电网储能系统控制对电能质量的保障[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(6): 87-93.
- [2] 袁性忠, 王辉, 贾宏刚, 等. 基于储能型APF的微电网电能质量综合治理[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 238-244.
- [3] 陈昌强, 王万斌, 田世东, 等. 分布式电源与储能协同的台区电能质量治理[J]. 电力电子技术, 2022, 56(11): 92-95.
- [4] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
- [5] 石文辉, 屈姬贤, 罗魁, 等. 高比例新能源并网与运行发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 52-63.
- [6] 任冲, 柯贤波, 王吉利, 等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力电子技术, 2022, 41(3): 110-117.
- [7] 王天阔, 王迪扬, 黄佳, 等. 基于光/储电源的配电网优化运行策略[J]. 电器工业, 2025(1): 15-18.
- [8] 刘景霞, 王硕秋. 微电网并离网平滑切换控制策略研究[J]. 电工技术, 2023(2): 29-31, 35.
- [9] 陈金玉, 邓超平, 林国栋, 等. 用于供电品质改善的多功能三电平混合储能变流器设计研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 137-143.
- [10] 王建, 武东, 孙元庆, 等. 典型中频炉配电系统谐波干扰分析及应用[J]. 电气应用, 2023, 42(3): 50-55.

作者简介

王建 (1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事电能质量控制技术及装置研究工作, 电能质量产品、试验电源、新能源储能系统等产品的研发、设计及技术推广。

(收稿日期: 2025-02-17)