

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181042

高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述

张金平^{1,2}, 汪宁渤^{1,2}, 黄蓉^{1,2}, 马明^{1,2}, 何世恩^{1,2}

(1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省新能源并网运行控制重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 光伏发电的波动性和随机性会造成高渗透率光伏发电系统输出功率随机波动, 进而加重了电网频率调节负担。同时高比例光伏发电接入系统, 会替代部分常规机组, 进一步削弱了电网调频能力。针对高比例光伏并网对电网频率稳定带来的全新挑战, 分析了光伏发电接入系统对电网频率稳定性的影响机理。介绍了当前光伏发电参与系统频率调节的技术路线。最后, 结合当前我国电网和新能源发展实际情况, 展望了今后需要进一步关注的问题。

关键词: 光伏发电; 高渗透率; 系统调频; 虚拟同步机技术; 储能调频

Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic

ZHANG Jinping^{1,2}, WANG Ningbo^{1,2}, HUANG Rong^{1,2}, MA Ming^{1,2}, HE Shien^{1,2}

(1. State Grid Gansu Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Wind Power Integration Operation and Control of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The volatility and randomness of photovoltaic generation will cause the output power of high-penetration photovoltaic generation fluctuate randomly and then increase the burden of power grid frequency adjustment. At the same time, high-penetration photovoltaic generation access of power grid will replace some conventional units, further weakening the power grid frequency modulation capability. Aiming to the new challenge that high-penetration photovoltaic has obviously affected the stability of grid, firstly this paper analyzes how can the photovoltaic generation affect the frequency stability of power grid. Then it introduces the current technical route of photovoltaic frequency regulation. Finally, the problems needed to be further studied are prospected considering the development of power grid and new energy in China.

This work is supported by Major Special Project of Gansu Province (No. 17ZD2GA010) and Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company (No. 52272716000K).

Key words: photovoltaic generation; high-penetration rate; system frequency regulation; VSG; energy storage frequency modulation

0 引言

近年来, 由于化石能源的短缺及环境污染等问题, 使得风光等新能源发电得到各国政府的重视和支持。在科技创新和国家政策推动下, 我国太阳能光伏发电规模快速扩大。根据国家能源局发布的统计数据, 2015年我国光伏装机总量为43.18 GW, 全年发电量392亿 kW·h, 占全国全年总发电量的0.57%; 2016年达到77.42 GW, 全年发电量662亿

kW·h, 占全国全年总发电量的1%; 2017年累计装机量达130.25 GW, 全年发电量1182亿 kW·h, 占全国全年总发电量的1.8%。未来光伏发电作为电力系统的主力电源之一已成为必然^[1-2]。

随着光伏发电渗透率的不断提高, 挤占了部分常规机组空间, 降低了电网一次调频资源储备容量, 削弱了电网调频能力^[3], 为提升电网频率安全水平, 迫切需要研究光伏发电系统参与电网调频策略与方法^[4]。

为了提升光伏电站对电网频率变化的响应能力, 国内外很多学者对光伏电站响应系统频率变化进行了大量研究。现有公开文献主要针对微网、区

基金项目: 甘肃省重大专项(17ZD2GA010); 国网甘肃省电力公司科技项目(52272716000K)

域电网中光伏发电参与系统调频问题,可分为以下四个方面:一是仿照常规机组的有功-频率静特性,研究基于光伏电站功频静态特性的光伏一次调频能力^[5-12];二是研究光伏+储能系统控制策略以提升系统频率响应能力^[13-18];三是考虑负荷随机性特点,通过需求侧管理技术^[19-21]动态调节电力系统中功率平衡进而保持系统频率稳定;四是利用虚拟同步发电机技术使光伏发电更好地模拟同步发电机的调频特性^[22-29]。而涉及大电网中光伏参与调频研究甚少。

为此本文首先介绍了光伏发电接入系统对电网频率稳定性的影响机理;然后分析了当前光伏发电参与系统频率调节现状;在此基础上,结合当前我国电网和新能源发展实际情况,给出了光伏调频需要研究的若干重要问题。

1 光伏接入对系统频率的影响

频率稳定是电力系统安全稳定运行的重要因素,它反映了电力系统中有功功率供需平衡的基本状态^[30-31]。现有对光伏发电技术的研究中,光伏电站多采用最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制,MPPT控制使光伏阵列在最大功率点输出有功出力不可调,即不具备满足调频能力^[32]。

在天气变化引起光伏阵列出力剧烈波动时,会打破电力系统实时有功平衡,进而直接影响电网频率稳定。为分析研究光伏发电功率变化对系统频率稳定的影响机理,需要同时考虑常规机组和负荷两者的调节效应^[33],为简单起见只考虑一台常规机组、一座光伏电站和一个负荷的情况,且该负荷与频率变化无关。

假定某时刻光伏出力的改变量 ΔP_{PV} ,负荷改变量 ΔP_D ,频率变化量 Δf ,常规发电机组功频静特性系数 K_G ,常规发电机组的输出功率的变化量 ΔP_{G1} ,忽略网损,满足:

$$\Delta P_D = \Delta P_{PV} + \Delta P_{G1} \quad (1)$$

将常规发电机的输出功率改变量 $\Delta P_{G1} = -K_G \Delta f$ 代入式(1),得

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{PV} - \Delta P_D}{K_G} \quad (2)$$

忽略负荷改变量 ΔP_D ,则式(2)化简为

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{PV}}{K_G} \quad (3)$$

由式(3)可以直观得出,随着光伏渗透率的增加,系统中常规发电机组等效功频静特性系数减小,

光伏有功波动程度又进一步加剧了系统频率的不稳定性,对电力系统的频率稳定造成一定程度的威胁。由于系统一次调频属于有差调节,以系统的功频静特性为基础的频率一次调整的作用是有限的,它只能适应变化幅度小、变化周期较短的变化负荷。对于大规模光伏发电并网,其发电功率在区域电网中的占比较高,则天气因素引起的功率变化幅度大、变化周期较长,电力系统中的常规机组需要通过二次调频来应对光伏电站功率波动所造成的系统频率波动^[34]。

假设系统二次调整时发电机的功率增量为 ΔP_{G2} ,则满足式(4)。

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{PV} + \Delta P_{G2} - \Delta P_D}{K_G} \quad (4)$$

忽略负荷改变量 ΔP_D ,则式(4)化简为

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{G2} + \Delta P_{PV}}{K_G} \quad (5)$$

从式(5)得出,当系统二次调整所得到的常规发电机组功率增量能完全抵偿光伏组件的功率变化量时,频率将维持不变。若二次调整所得到的发电机组功率增量不能满足光伏功率波动变化的需要时,系统的频率就不能恢复到原来的数值。如果光伏有功变化率越大,则系统频率偏差越大,进一步加深了系统频率的不稳定性。

综上所述,由于大规模光伏发电接入系统,必然挤占一部分常规机组,从而降低电力系统的转动惯量和阻尼,降低电网一次调频能力。由于一次调频是有差调节,随着光伏波动,导致系统频率偏离程度加大;需要系统二次调整,在二次调整时,常规发电机组功率增量不能满足大规模光伏功率波动时,将进一步加深系统频率偏离程度,这将严重威胁电网频率安全稳定,引发电网事故。

2 当前光伏调频技术研究应用现状

随着光伏发电渗透率的不断提高,挤占了部分常规机组空间,降低了系统惯性,严重威胁系统频率稳定。目前光伏调频技术研究主要围绕微网孤岛、区域电网中光伏发电并网调频问题展开。

2.1 一次调频

光伏电站工作在最大功率跟踪模式时,没有可用的备用功率,无法参与电网调频。通过控制光伏阵列实际工作电压稍高于最大功率跟踪点处电压,使其减载运行,从而预留一定的功率备用使得光伏发电系统具备随时参与系统调频的能力^[5-6],如图1所示。

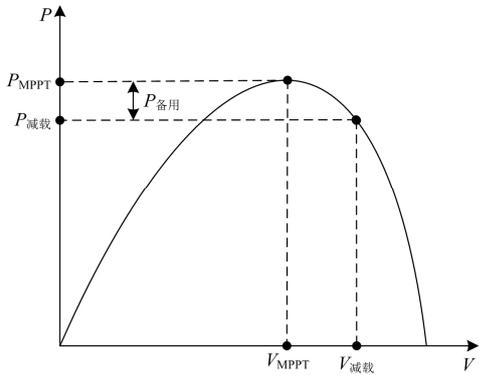


图 1 光伏发电系统减载运行预留备用功率示意图

Fig. 1 Schematic of reserve power in deloaded PV system

在此基础上, 相关文献仿照常规机组的有功-频率静特性, 研究基于光伏电站功频静态特性的光伏一次调频能力, 部分文献将频率下垂控制引入一次调频中。文献[7]提出了一种基于功率-频率函数来平抑高渗透率光伏发电系统频率偏差的控制策略。文献[8]针对采用固定系数下垂控制策略调频的局限性, 研究在双级式光伏并网系统中过频和低频两种频率模式下采取不同的方式整定下垂控制参数以充分发挥光伏的调频能力。文献[9]通过基于光伏功频静特性的频率下垂的一次调频控制策略, 在光伏系统中省去了储能系统, 降低了系统成本。文献[35]针对光伏逆变器开关的下垂控制导致逆变器惯性低, 提出一种通过修改逆变器下垂系数来增加逆变器惯性的方法以提高系统瞬态响应。

上述文献仿照常规机组研究了光伏发电系统的一次调频特性。由于光伏发电不同于常规机组, 为了使光伏发电系统最大程度地提供频率支撑, 还应考虑系统频率动态变化时, 备用容量、常规一次调频等其他约束因素对光伏发电系统调频能力的影响。为此, 文献[10]研究考虑动态频率变化和光伏调频容量约束的机组组合模型以增强光伏参与系统调频能力。文献[11]提出一种基于变减载率的光伏机组调频控制策略, 依据电网频率改变光伏减载运行水平参与电网频率调节。文献[12]分析光伏单独参与系统调频、光伏与常规机组一起参与频率两种调节模式下光伏减载运行特性。

综上, 光伏减载运行使得并网光伏阵列具备了一次调频的功能, 光伏出力具有波动性和不可控性, 尤其是局部阴影下的光伏运行情况增加了光伏系统参与系统调频的难度和复杂程度, 如何实现光伏功频特性控制参数与备用容量最佳动态匹配, 使光伏发电系统有效参与系统频率调节、合理分担系统调频压力依然有待深入研究。此外, 光伏电站退出一

次调频时对系统频率稳定的影响有待研究。

2.2 附加储能系统参与系统调频研究

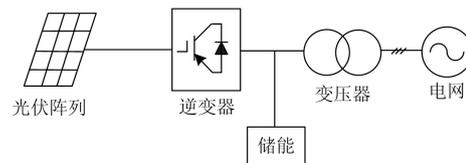
储能系统具有快吐纳能量的能力, 可以有效抑制新能源电力的随机波动^[36], 与传统发电机组相比, 储能系统尤其是电池储能具有响应速度快、调节精度高等优势, 非常适合提供调频服务, 如表 1 所示。

表 1 电池储能系统与常规机组调频特点对比

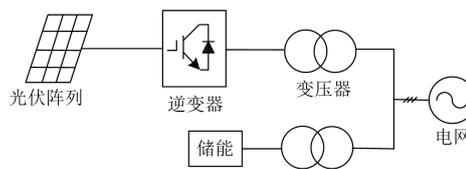
Table 1 Comparison of frequency modulation characteristics between battery energy storage system and conventional unit

调频设备	调频特点
火电机组	调节响应速度较慢, 精度比较低, 调节输出有限, 机组频繁调频会降低火电机组使用率、加速设备磨损、增加维修成本、增加煤耗
水电机组	调节速度较快, 调节幅度大, 调频效果较优于火电机组, 存在机组磨损的问题, 受地域、季节限制
储能系统	响应快速精准、容量可调, 运行过程中不会直接产生污染物, 调频效果是水电机组的 1.7 倍、燃气机组的 2.5 倍、燃煤机组的 25 倍以上

因此为光伏电站配置储能装置, 利用储能系统快速放出或吸收功率, 平滑光伏输出功率曲线, 减小系统有功功率波动对系统频率的影响, 以辅助传统机组提升电网整体调频能力已受到业界广泛关注^[13-15]。目前储能系统接入分为电源直流侧接入和交流侧接入两种方式。由于电源交流侧接入具有通用性强等优点, 使其具有广泛的应用前景。交流侧接入系统结构又分为低压侧接入和高压侧接入, 如图 2 所示。



(a) 配置在交流低压侧的光伏储能系统



(b) 配置在交流高压侧的光伏储能系统

图 2 光伏-储能系统示意图

Fig. 2 Schematic of PV-energy storage system

针对储能系统对高渗透率光伏接入微网系统频率的支撑作用: 文献[16]通过控制混合储能系统的充放电过程来配合光伏电站满足相应目标出力值的要求, 以平滑光伏并网功率的波动; 文献[17]研究在高渗透率光伏电网中, 对储能系统进行优化配置,

利用有限的储能容量实现光伏波动的有限平抑，从而保证高渗透率光伏电网频率稳定；文献[18]针对电网中新能源发电机组占比高的情况，研究储能系统的动态频率支持控制策略，在该控制策略下储能系统能够快速作用以减轻风能和光伏等非惯性发电系统对岛上电力系统动态性能的影响。目前张北风光储示范基地探索出一条世界首创的风光储联合发电运行模式，该模式中大规模风光电源依托储能系统参与系统调频运行，提高新能源系统运行的可靠性。

光伏附加储能系统参与调频额外增加了光伏电站的运行成本，降低了系统运行的经济性，需以综合考虑系统运行可靠性、安全性以及经济性为目标寻求最优容量配置方案。目前已有学者针对光伏微网系统中储能系统的优化配置策略进行了研究。文献[37]重点关注光伏-储能联合系统在调频市场辅助服务中的应用，研究应用于光伏电站的储能系统容量需求配置方法。文献[38]针对光伏发电系统配置储能系统增加了系统运行成本，考虑了具体的需求响应方式(峰谷分时电价)对光伏微网内的能量调度及储能容量配置的影响，提出了储能系统多目标容量优化配置模型。文献[39]研究考虑价格型需求响应不确定性的并网型光伏微电网储能系统优化配置方法。现有储能系统优化配置模型多采用数学建模方式，随着电力市场的不断完善，不同场景需求响应的不确定性因素增加了数学建模难度，因此探究电力市场环境需求响应对储能系统优化配置的影响有待进一步深入。

2.3 需求侧管理技术参与系统调频研究

电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的，系统频率除了受到大规模光伏出力波动的影响外，负荷剧烈波动亦会威胁系统频率。因此除了在电源侧配置储能系统平抑光伏出力波动外，还需重视需求侧管理。需求侧管理是调节电力系统中的负荷需求，通过动态调节电力系统中功率平衡，进而保持系统频率稳定。目前对于综合考虑系统负荷的频率调节研究相对较少^[19]。文献[40-41]仅将光伏发电视为负的负荷，研究火电机组优化参数以提升火电机组的调频能力，缓解光伏并网对系统频率的影响，其中未考虑系统中其他负荷的变化影响。文献[20]将风光机组的输出功率视为注入功率为负的负荷，与负荷功率求和得到负荷综合曲线，利用该综合曲线指导微电网的三次调频。文献[21]利用光伏出力的可快速调节特性以及可投切负荷容量较大的特性，实现协调控制系统净出力的精确控制，

从而能够为电网提供一次调频功能，有效抑制电网频率波动。

2.4 虚拟同步发电机技术

为使光伏更好地模拟同步发电机的调频特性，国内外学者提出了光伏虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术。该技术通过控制接口逆变器使光伏发电并网具备与常规机组接近的外特性，实现主动调频控制，提高了电网对新能源的消纳能力，正在成为光伏高渗透并网场景下提升系统稳定运行能力的有效方案之一^[1,22,42]。基于VSG技术的控制框架如图3所示。

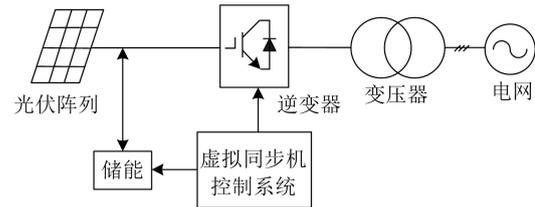


图3 光伏虚拟同步发电机控制示意图

Fig. 3 Control diagram of PV-VSG

文献[23]研究基于VSG特性的电网友好型光储分布式电源控制策略，分析了离网运行模式、并网发电模式、频率调节模式下VSG的有功-频率调节的控制过程，并以VSG的暂态能量分析为基础，提出了虚拟转动惯量动态调节方法以改善光伏出力的波动和电网频率。文献[24]提出对储能逆变器采用虚拟同步发电机控制策略，使光-储作为一个整体对外具备类似同步发电机特性，通过仿真分析验证了该方法能够保证系统频率稳定，并使系统惯量得到有效补偿。文献[43]基于VSG技术，在传统可再生能源并网单元的基础上增加相应的储能单元，并在先进的控制算法的作用下，可再生能源并网单元可以被模拟为传统的同步发电机，从而大大改善配电网对可再生能源的接纳能力。文献[4]仿照常规机组的有功-频率静态特性，通过修改光伏逆变器控制策略，实现光伏逆变器参与电网快速频率响应功能，并指出相同容量下，其快速频率响应贡献能力优于常规火电机组一次调频贡献能力。

此外，VSG技术可以弥补因高渗透率光伏接入系统导致的系统惯性支撑能力不足的问题，提升系统惯性。文献[25-27]研究发现通过控制储能变频器使得流过储能系统的有功功率与电网频率的导数成反比，可以为系统提供类似于常规机组的惯性响应，提升系统惯性响应。文献[28]研究成比例控制直流环节电容器电压与电网频率变化，从而实现系统频率调节。文献[29]在光伏阵列中引入一种自适应虚

拟惯性控制使光伏阵列类似于常规机组提供虚拟惯性响应,并成功实现了动态功率在惯性支撑光伏阵列间的合理分配。通过增加或减少储能功率以响应系统频率变化可以为系统提供类似于常规机组的惯性响应,如何动态协调控制不同储能间有功功率的分配,为系统提供最优虚拟惯性有待进一步关注。

2016年,国家电网公司在张北风光储示范电站开工建设了首个应用于大电网的VSG示范工程,探索多种实现方式和技术路线的可行性与经济性,初步完成24台12MW光伏逆变器的虚拟同步机技术改造工作^[42]。文献[1]从理论分析、现场实测数据对比等方面对张北VSG示范工程采用模拟转子运动方程和改变功率给定值两类光伏虚拟同步发电机调频控制策略和实现方式进行研究。

3 光伏发电调频技术的未来研究课题

围绕清洁能源开发布局,我国大力发展适用于远距离、大容量输电的特高压交直流输电技术,我国电源、电网络局持续发生重大变化,给电网安全运行及光伏发电参与系统调频带来全新的挑战^[44-46],相关问题有待进一步研究:

1) 光伏参与大电网调频的控制策略研究。针对我国电网发展格局和新能源消纳要求,应开展特高压交直流混联等复杂大电网结构下光伏快速频率响应与系统中风电、常规机组、直流系统频率调节乃至需求侧负荷管理等协同运行策略研究。

2) 对光伏调频标准的研究。现阶段光伏参与电网调频的相关标准不具体、调频参数配置原则不统一。应进一步分析云团移动、沙尘遮挡等异常天气因素对光伏调频性能的影响,从系统稳定性、动态性能、经济性的角度出发,深入研究调频参数选取方法,并提出相应的光伏参与电网调频的控制策略、运行标准。

3) 光伏VSG技术的实际工程推广方面。当前光伏虚拟同步机技术参与频率调节缺乏工程实用化的技术规范,应综合考虑调频需求、VSG并网稳定性、故障抑制、多机并联、运行经济性等,明确系统控制参数对VSG性能的影响,提出VSG之间以及VSG与常规机组协同优化的控制策略。

4) 储能辅助光伏调频的协调机制与控制技术方面。当前储能技术类型呈现多元化,应综合考虑不同天气情况下光伏运行状况、各类型储能系统性能、系统的调频需求、运行效益最优等约束进一步研究在系统故障、负荷投切等扰动场景下不同类型储能辅助光伏调频的运行模式,明确各类型储能调频性能参数的影响规律,提出最优储能选型方案和

系统参数配置原则,完善储能辅助新能源调频运行时相互间的协调机制与控制策略。

5) 加强基础应用与光伏调频的技术融合。光伏参与调频基于快速可靠的通信、频率测量及准确的出力预测技术^[47],为在大电网系统中更好地发挥光伏快速调频优势,应充分应用大数据、云计算、物联网等先进信息技术,围绕数据测量、存储、管理与分析,研究建立支撑光伏参与电网调频稳定运行的数据服务平台,实现电力系统中不同环节间的数据实时交换与处理,提升电网调频的整体协同能力,确保电网频率稳定。

4 结论

由于光伏发电的波动性和随机性会造成高渗透率光伏发电系统输出功率的随机波动,进而加重了电网频率调节负担;同时高比例光伏发电接入系统,会替代部分常规机组,进一步削弱了电网调频能力。为提升电网频率安全水平,研究光伏并网发电参与系统频率调节已成为当前研究热点。

本文在分析光伏发电接入系统对电网频率稳定性的影响机理和介绍当前光伏发电参与系统频率调节的技术路线的基础上,结合当前我国电网和新能源发展实际需求,展望了未来光伏调频需要研究的若干重要问题。相信随着光伏调频技术的快速发展,可以进一步提升能源系统运行可靠性,促进光伏发电产业的健康持续发展。

参考文献

- [1] 巩宇,王阳,李智,等. 光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 149-156.
GONG Yu, WANG Yang, LI Zhi, et al. Engineering application effect analysis and optimization of photovoltaic virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 149-156.
- [2] 王岩,魏林君,高峰,等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [4] 孙骁强, 刘鑫, 程松, 等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2792-2798.
SUN Xiaoqiang, LIU Xin, CHENG Song, et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2792-2798.
- [5] MISHRA S, ZARINA P P, SEKHAR P C. A novel controller for frequency regulation in a hybrid system with high PV penetration[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [6] ZARINA P P, MISHRA S, SEKHAR P C. Deriving inertial response from a non-inertial PV system for frequency regulation[J]. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December 16-19, 2012, Bengaluru, India: 1-5.
- [7] NEELY J, JOHNSON J, DELHOTAL J, et al. Evaluation of PV frequency-Watt function for fast frequency reserves[J]. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), March 20-24, 2016, Long Beach, CA, USA: 1926-1933.
- [8] NANOU S I, PAPAKONSTANTINOOU A G, PAPATHANASSIOU S A. A generic model of two-stage grid-connected PV system with primary frequency response and inertia emulation[J]. Electric Power System Research, 2015(127): 186-196.
- [9] XIN Huanhai, LIU Yun, WANG Zhen, et al. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 985-993.
- [10] 叶婧, 林涛, 张磊, 等. 考虑动态频率约束的含高渗透率光伏电源的孤立电网机组组合[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 194-202.
YE Jing, LIN Tao, ZHANG Lei, et al. Isolated grid unit commitment with dynamic frequency constraint considering photovoltaic power plants participating in frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 194-202.
- [11] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013-1024.
ZHONG Cheng, ZHOU Shunkang, YAN Gangui, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve lever control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1013-1024.
- [12] ZARINA P P, MISHRA S, SEKHAR P C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 60: 258-267.
- [13] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed Energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [14] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16.
- [15] KABIRI D, SHIANI P, NAEEM B. Improving system frequency in smart grids in presence of wind and PV generation units using flywheel energy storage system[J]. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 2015, 4(1): 116-123.
- [16] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 75-83.
TIAN Chunguang, TIAN Li, LI Dexin, et al. Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 75-83.
- [17] 付爱慧, 张峰, 张利, 等. 考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 53-61.
FU Aihui, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Capacity optimization strategy of energy storage system for power grid with high penetration of photovoltaic considering limited smoothing of photovoltaic ramping power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 53-61.
- [18] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [19] DATTA M, SENJYU T, YONA A, et al. A frequency-

- control approach by photovoltaic generator in a PV-diesel hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 559-571.
- [20] 张羽, 李咸善. 基于频率调整策略的微电网多目标优化自愈控制[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 831-839.
ZHANG Yu, LI Xianshan. Multi-objective optimization for microgrid self-healing control based on frequency regulation strategy[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 831-839.
- [21] 刘云, 卢泽汉, 章雷其, 等. 光伏发电系统与可投切负荷协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 10-16.
LIU Yun, LU Zehan, ZHANG Qilei, et al. A coordinated control strategy for photovoltaic systems and controllable loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 10-16.
- [22] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [23] 温焯婷, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 一种电网友好型光储分布式电源控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 464-475.
WEN Yeting, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. A grid friendly PV/BESS distributed generation control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 464-475.
- [24] 严干贵, 张礼珏, 赵伟哲, 等. 基于虚拟同步发电机的光-储调频控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(3): 1-6.
YAN Gangui, ZHANG Lijue, ZHAO Weizhe, et al. Strategic studies on frequency-modulated controlling of photovoltaic-energy storage system based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(3): 1-6.
- [25] DATTA M, ISHIKAWA H, NAITOH H. LFC by coordinated virtual inertia mimicking and PEVs in power utility with MW-class distributed PV generation[C] // IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, June 10-13, 2012, Kyoto, Japan: 1-8.
- [26] DATTA M, ISHIKAWA H, NAITOH H. Frequency control improvement in a PV-diesel hybrid power system with a virtual inertia[C] // IEEE 7th Conference on Industrial Electronics and Applications, July 18-20, 2012, Singapore, Singapore: 1167-1172.
- [27] WANG X, YUE M, MULJADI E. PV Generation enhancement with a virtual inertia emulator to provide inertial response to the grid[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA: 17-23.
- [28] WAFENSCHMIDT E, HUI R S Y. Virtual inertia with PV inverters using DC-link capacitors[C] // 18th European Conference on Power Electronics and Applications, September 5-9, 2016, Karlsruhe, Germany: 1-10.
- [29] HOSSEINIPOUR A, HOJABRI H. Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with constant power loads[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(4): 430-438.
- [30] 刘梦欣, 王杰, 陈陈. 电力系统频率控制理论与发展[J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 135-145.
LIU Mengxin, WANG Jie, CHEN Chen. Theory and development of power system frequency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 135-145.
- [31] 程含渺, 李红斌, 邵周策, 等. 考虑多种影响因素的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 9-15.
CHENG Hanmiao, LI Hongbin, SHAO Zhouce, et al. Research on distribution of power frequency considering on multiple influence factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 9-15.
- [32] SALMAN S, AI X, WU Z. Design of a P-&O algorithm based MPPT charger controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [33] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 111-120.
- [34] 王诚良, 朱凌志, 党东升, 等. 云团移动对光伏电站出力特性及系统调频的影响[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1626-1631.
WANG Chengliang, ZHU Lingzhi, DANG Dongsheng, et al. Impacts on photovoltaic power characteristics and power system frequency regulation with cloud cluster movement[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1626-1631.
- [35] 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.
- [36] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 157-169.
ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power

- grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [37] 金楚, 周博, 艾小猛, 等. 考虑光储联合系统参与频率响应的储能容量优化配置方法[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 361-368.
JIN Chu, ZHOU Bo, AI Xiaomeng, et al. Optimal configuration of energy storage capacity with PV-storage system participating in frequency regulation service[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 361-368.
- [38] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage Multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [39] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.
LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainly of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [40] 蒋小亮, 丁岩, 全少理, 等. 光伏渗透率对电力系统频率的影响及控制策略[J]. 武汉大学学报, 2015, 48(5): 686-689.
JIANG Xiaoliang, DING Yan, QUAN Shaoli, et al. Influence of photovoltaic penetration on power system frequency and its control strategy[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(5): 686-689.
- [41] 李媛, 张志强, 郑超, 等. 考虑光伏电站高渗透接入的火电机组一次调频参数优化[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 115-122.
LI Yuan, ZHANG Zhiqiang, ZHENG Chao, et al. Primary frequency parameter optimization of thermal power units considering high-penetration access of photovoltaic power plant[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 115-122.
- [42] 唐酿, 盛超, 陈萌, 等. 虚拟同步发电机技术综述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(11): 30-38.
TANG Niang, SHENG Chao, CHEN Meng, et al. Review on virtual synchronous generator technologies[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 30-38.
- [43] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 22-31.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.
- [44] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [45] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [46] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [47] 傅业盛, 桑姐, 曹炜, 等. 欧盟的 REServiceS 项目以及对我国风电及光伏参与电网调频的启示[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 613-621.
FU Yesheng, SANG Dan, CAO Wei, et al. REServiceS project of EU and its enlightenment to China's wind power and PV participation in grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 613-621.

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2019-04-22

作者简介:

张金平(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源发电并网技术及政策研究。E-mail: zhangjinpingsg.cs.gcc.com.cn

(编辑 魏小丽)