水光互补系统实时电力互补特性应用研究

利用水电机组快速调节性能平滑并网光伏电站出力波动的水光互补系统目前尚无运行特性分析及评价考核方法和标准。以龙羊峡水光互补系统为例，详细介绍了水光互补运行特性，并提出了应用于水光互补系统评价考核的补偿度方法，通过对该方法的科学性和合理性的理论论证以及在不同天气情况下进行补偿度的试验验证，表明该方法可以科学准确地表征水光互补性能优劣。通过补偿度的评价表明龙羊峡水光互补系统能平滑光伏波动对系统的影响，切实提高系统稳定水平。

刘娟楠／国网陕西省电力公司经济技术研究院
贺元康　赵　鑫／国家电网公司西北分部

刘娟楠／工程师

关键词／Keywords
水光互补系统·
补偿度·
水电站·
光伏电站·
光伏波动·

光伏发电属于能量密度低，稳定性差，调节能力弱的能源，具有间隙性、波动性和随机性等缺点，容易给电网稳定运行造成一定冲击，电力系统需要有足够的备用容量和调节手段来削弱这种冲击。随着光伏发电系统在电网中所占比例的不断增大，其大幅、频繁的随机波动对电力系统有功平衡造成了冲击，进而影响到系统的一次、二次调频以及有功经济调度等运行特性，频率越限风险加大，电力系统稳定问题日益突出[1-3]。因此，必须寻求有效手段减小光伏发电功率的波动对电网运行的影响。目前对光伏并网进行研究以达到平滑并网功率的研究主要有：文献[4]利用电池储能系统对光伏发电电能进行存储和释放，改善光伏发电并网输出功率波动的问题，并分析电池储能系统的功率和容量需求；文献[5]采用超级电容器与锂电池组成混合储能系统，进行光伏电源有功出力优化；文献[6]提出基于改进微分进化算法的风光互补混合供电系统容量优化配置模型，其与风电或光伏独立供电系统相比更为经济、可靠，能很好地适应环境的变化。

本文提出了利用水电机组优越的调节性能对光伏发电功率进行调节，改善光伏发电并网输出功率波动的水光互补运行方式。水光互补运行是指光伏电站与水电站分时段、分情况运行，形成互补，利用水电机组起动迅速、调节灵活和负荷响应快等特点，对大容量光伏电站出力进行快速补偿调节，以降低光伏发电出力的波动性和间歇性，满足电网对光伏电站上网功率和频率的要求。

水光互补运行特性分析

1. 光伏电站运行特性

龙羊峡水光互补光伏电站工程位于青海省海南州共和县，光伏电站以一回330 kV线路送入龙羊峡水电站330 kV母线，将光伏出力和龙羊峡机组出力汇集，利用龙羊峡水电站已建的5回送出线路接入系统。

光伏电站发电出力受太阳能昼夜变化、季节变化、云层厚度和温度等多种因素的影响，具有明显的间歇性、波动性、随机性、不可改变和不可储存等特点，光伏出力会呈现不规则的波动。光伏电站投运以来在雨天、晴天和多云天气的典型出力波动曲线如图1～图3所示。

由图1～图3可知，晴天天气日照均匀充足，受干扰因素较小，光伏出力波动较小；多云天气由于云层运动遮挡太阳光线，对光照强度影响较大，进而影响光伏出力，光伏波形呈现不规则锯齿

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

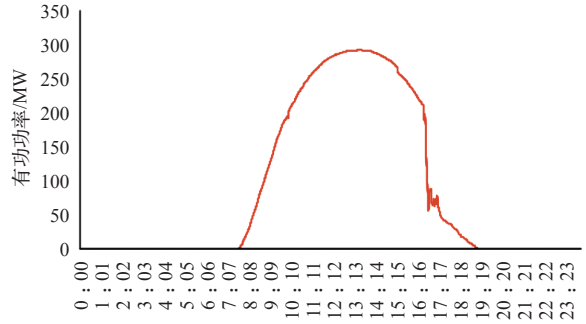

图1　晴天光伏电站典型出力曲线图

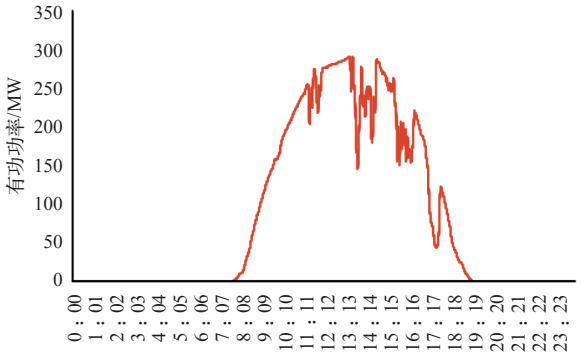

图2　多云天气光伏电站典型出力曲线图

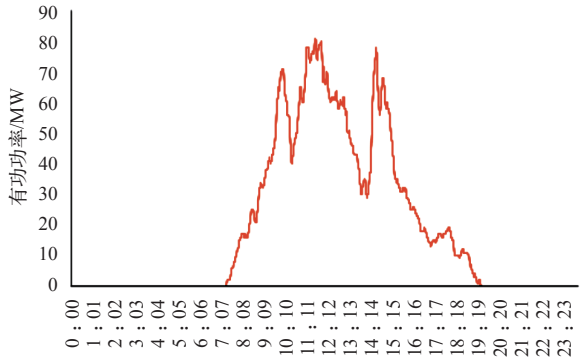

图3　阴雨天气光伏电站典型出力曲线图

状；阴雨天气云层、雨量和气温对光伏出力影响较大，阴雨天气光伏出力波动幅度大，波动频繁。

统计了光伏电站投运以来每分钟的出力变化范围和概率如表1所示。

表1　光伏电站出力变化规律

出力范围/（MW/min）	0～50	50～100	100～150	150～320
概率（%）	97.51	2.29	0.17	0.02

2. 龙羊峡水电厂运行特性

光伏电站东边紧邻龙羊峡水电站，龙羊峡水电站是黄河梯级水电站中的“龙头”电站。龙羊峡水电站总库容为247亿m^3，调节库容为194亿m^3，是一座具有调节性能的大型综合水利枢纽工程。水电站调节能力强，补偿能力强，具有为光伏电站进行水光互补调节的优越条件。龙羊峡水电站装机容量为4台300 MW混流式水轮机组，调速器参数如表2所示。

表2　龙羊峡水电厂调速器参数

技术指标	转速死区	I_x=0.03%
	静态特性曲线近似为直线	4.2%
	自动空载转速摆动相对值	±0.13%
	甩25%负荷接力器不动时间	0.15 s
	步进电动机工作行程	±5.5 mm（微电动机旋转±99°）
	步进电动机最大行程	±7 mm（微电动机旋转±126°）
	位移输出力	±1 500 N
	静态特性死区	＜0.000 85
调节参数范围	比例增益	K_p=3
	积分增益	K_I=2.5 1/S
	微分增益	K_D=3.5S
	永态转差系数	B_p=7.5%
	频率人工死区	ΔF=0～±0.5 Hz
	频率给定	F_0=45～55 Hz

基于表2的参数，进行水轮机组在不同负荷区间内的变负荷试验，试验结果如表3所示。

表3　水轮机组变负荷试验结果

出力范围/MW	0～50	50～100	100～150	150～320
调整时间/s	3～8	10～15	20～33	35～66

由表3的结果数据对比表1光伏出力变化数据可知，龙羊峡水电机组在额定功率内负荷变动时间基本可以控制在1 min内，基本可以满足光伏互补的要求。

3. 水光互补运行特性分析

水电站对光伏电站的补偿调节主要是以日内补偿为主，尽量不改变龙羊峡水电站的日出库总水量，不改变龙羊峡水电站年、月的出库水量，不影响龙羊峡水库与刘家峡水库两库的联合补偿运行调度原则。水光互补后水电站流量的波动可由下游水电站反调节，对龙羊峡水电站及下游梯级电站的运行影响较小。龙羊峡水光互补运行后对其承担系统调峰能力有一定影响，但相对青海

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

黄河梯级水电站的调峰能力来说，影响较小[7-8]。

水光互补典型曲线如图4所示，由图4可以看出，进行水光互补后，龙羊峡水电站机组出力与光伏电站发电功率呈现互补反调节特性。在7：00～19：00有太阳光的时间段，龙羊峡机组实时跟踪光伏机组出力互补运行，其余时段根据黄河上游梯级水电站调度水量电量要求进行灵活调整，保证龙羊峡水电站全天水量电量计划值不变。

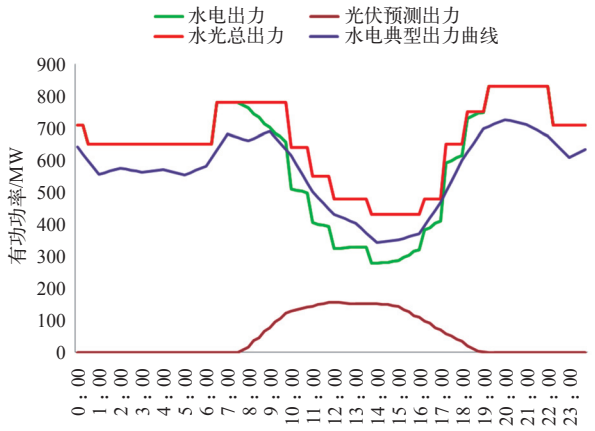

图4 水光互补典型曲线

水光互补补偿度

为了科学地评价水电机组补偿光伏变化的能力，准确地衡量水电机组在光伏随机波动和突变时的跟随互补性能，提出用于水光互补性能评价和考核的补偿度概念。

补偿度表示在评价考核周期内水光互补运行的水电机组出力变化量减去由于频率波动导致机组一次调频动作引起的水电机组出力变化量的偏差与光伏的变化量的比值。补偿度的公式为

$$\rho=\sum_{i=1}^{N}\left|(\Delta P_{i光伏}/\Delta t+(\Delta P_{i机组AGC变化}-\Delta f_i K)/\Delta t)\right| \quad (1)$$

补偿度为

$$w=\left(1-\frac{\rho}{\sum_{i=1}^{N}\left|\Delta P_{i光伏}/\Delta t\right|}\right)\% \quad (2)$$

式中，$\Delta P_{i光伏}$为光伏波动偏差；Δt为采样计算周期；$\Delta P_{i机组AGC变化}$为进行光伏互补的水电机组在AGC调节下的出力变化量；N为考核周期；Δf_i为采样周期前后频率变化范围；K为机组调差系数。

由式（1）、式（2）可知，补偿度将频率变化引起的机组一次调频变化量减去，使衡量标准更加合理，并且将光伏变化量和水电机组变化量求和后取绝对值，这样可将光伏变化量的正偏量和负偏量一并累计，避免正负抵消。

同时式（2）将互补变化量之和与光伏变化量之和作比表明互补后的光伏变化量占总的光伏变化量的组分比例。如果补偿效果好，该比值应较小并接近于零，最后用1减去该比值是为了符合正常理解逻辑的表征补偿度这一概念。

基于补偿度的概念，在晴天、多云和阴雨天气分别进行水光互补的AGC试验，不同天气情况下水光互补后光伏变化量与水电调整变化如图5～图7所示，不同天气情况下的补偿度结果如表4所示。

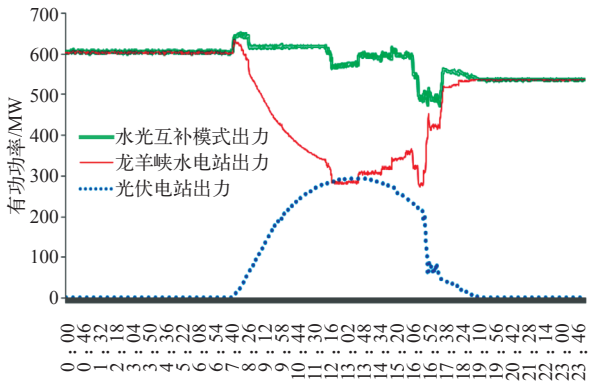

图5 晴天天气水光互补模式下出力曲线

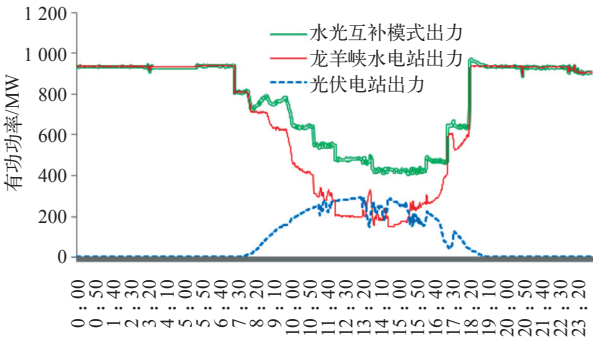

图6 多云天气水光互补模式下出力曲线

由图5～图7可以看出，在不同天气情况下水光互补此消彼长的互补趋势，通过水电机组快速调节性能，将光伏发电锯齿形出力曲线调整为平

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

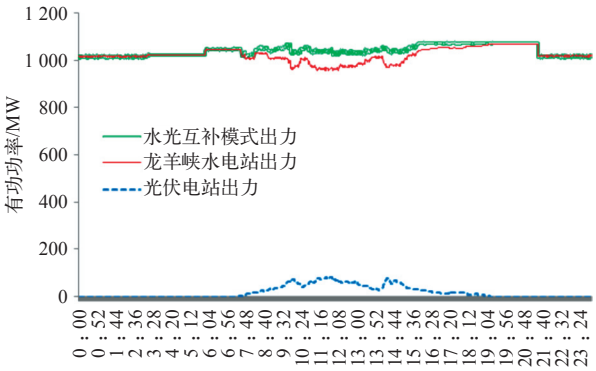

图7　阴雨天气水光互补模式下出力曲线

滑稳定曲线，为电网提供优质电能。

表4　不同天气情况下水光互补评价结果

天气	晴天	多云	阴雨
补偿度（%）	98.12	90.57	92.72

由表4数据可知，在不同的天气情况下，互补度都在90%以上，互补度评价指标与互补曲线一致，水光互补系统在不同的天气状况下有较好的互补特性。

结束语

龙羊峡水光互补系统在考虑龙羊峡水电站水量平衡的基础上，结合龙羊峡水库调节能力，通过水电机组快速调节性能，将光伏电站锯齿形出力曲线调整为平滑稳定曲线，为电网提供优质电能，提高电网运行稳定性，同时也提高水电站对电网的调节能力和送出线路的利用率，龙羊峡水光互补系统优化了光伏发电电能质量，解决了光伏电量消纳瓶颈问题，为我国清洁能源利用提供了新型发展模式。

参考文献

[1] 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.

[2] 张伯泉，杨宜民．风力及太阳能光伏发电现状及发展趋势 [J]．中国电力，2006，39 (6)：65-67.

[3] Tang Yehua，Xie Jian．Status and expectation of photovoltaic technology [J]．Renewable Energy，2005 (3)：68-69.

[4] 靳文涛，马会萌，李建林，等．电池储能系统平抑光伏功率波动控制方法研究 [J]．现代电力，2013，30 (6)：21-26.

[5] 邱培春，葛宝明，毕大强．基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (3)：29-33.

[6] 杨琦，张建华，刘自发，等．风光互补混合供电系统多目标优化设计 [J]．电力系统自动化，2009，33 (17)：86-90.

[7] 廖春梅，郑永恒，张云辉．综合利用要求下的黄河上游梯级水电站日运行方式的探讨 [J]．电网与水力发电进展，2007，20 (4)：72-74.

[8] 乔秋文．黄河上游梯级水电站调度与水量综合利用 [J]．电网与水力发电进展，2007，19 (3)：51-54.

（收稿日期：2015－05－20）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net