

光伏发电储能系统对电网潜在经济效益的研究

郭树锋¹, 杨雅兰², 罗美玲³, 寿海宁³, 温靖华³

(1. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 青海 西宁 810000;

2. 中国石油庆阳石化公司, 甘肃 庆阳 745002;

3. 国网宁夏电力公司电力调度控制中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 针对光伏发电的波动性和随机性造成太阳能资源利用率低, 光伏企业经济效益较差及其他间接成本高的问题, 通过对实际工程的研究, 本文提出了储能系统能量时移作用方法。结果表明: 储能装置能量时移方法可有效减少光伏电站弃光现象, 降低旋转备用容量补偿成本、AGC调频容量补偿和可靠性成本及电网扩建成本和环境治理成本, 提高光伏发电系统的潜在经济效益。

关键词: 储能系统; 光伏发电; 潜在效益

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2017)05-0045-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2017.05.007>

Study on the influence of photovoltaic power storage system on the potential economic benefit of power grid

GUO Shufeng¹, YANG Yalan², LUO Meiling³, SHOU Haining³, WEN Jinghua³

(1. Economic Research Institute of State Grid Qinghai Power Company, Xining Qinghai 810000, China;

2. China Petroleum Qing yang Petrochemical Company Qing yang Gansu 745002, China;

3. Dispatching & Control Center of State Grid Ningxia Power Company, Yinchuan Ningxia 750001, China)

Abstract: The fluctuation and random of the photovoltaic power generation cause the low utility of the solar energy resources, the poor economic benefit of the photovoltaic enterprises and other high indirect cost. Aiming at the above problems, by the study of the practical engineering, puts forward the method of energy time shift effect of energy storage system. The results show that the method of energy time shift effect of energy storage system can effectively reduce the power abandon phenomena of the photovoltaic power station, decrease the compensation cost of whirling standby capacity, AGC frequency regulation capacity compensation, reliability cost, power grid expansion cost and environmental treatment cost, and the method can promote the potential economic benefit of the photovoltaic power generation system.

Keywords: energy storage system; photovoltaic power generation; potential benefit

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2017.05.007

由于储能技术的快速发展,同时储能系统能够根据计划适时输出平稳的功率,合理配置储能系统对光伏发电系统进行功率调节和控制,一方面,可以较好地满足系统对调频的要求,减少电网针对光伏发电实际出力与预报出力的偏差所配置的旋转备用容量补偿成本;另一方面,可以平滑光伏发电出力波动,提高电网运行的可靠性,降低因光伏出力波动而导致的输配电设备维护折旧费用^[1]。

1 研究现状及需要解决的问题

1.1 研究现状

目前,如何平滑光伏电站的出力曲线,降低光伏发电出力的波动性和随机性,是进一步提高光伏企业经济效益和降低各项间接成本的热点研究问题。文献[2-4]对储能系统能量控制做了理论研究,分析光伏电站系统弃光引起的电量损失,工程应用较少,未涉及调频容量补偿和可靠性,以及电网扩建和环境治理等方面的潜在经济效益。

1.2 需要解决的问题

- (1)降低旋转备用容量补偿成本;
- (2)降低自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)调频容量补偿和可靠性成本;
- (3)减少电网扩建成本和环境治理成本。

2 储能系统对电网运行的潜在经济效益

2.1 潜在经济效益

本文提出的光伏发电系统能量时移方法是一种光伏系统能量管理方法,即在光伏电站有冗余出力时,对储能装置进行充电;在发电低谷时,将储存的电能量释放供电,可增加电站的收益,有效利用输电通道。根据工程实际规模和电网运行情况,配置光伏系统储能容量和储能控制,提高电网运行的潜在经济效益。

2.1.1 降低旋转备用容量补偿成本

由于光伏电站预报出力与实际出力存在偏

差,因此系统旋转备用容量增加。由于光伏发电出力可信度决定了由光伏发电引起的这部分成本,所以用基于光伏发电出力预测可信度的光伏旋转备用容量补偿成本来表示系统总的光伏发电旋转备用容量补偿成本^[5]

$$F_{\text{SRC}} = \sum_{j=1}^n P_{\text{SRC}}(1 - E_j) \cdot P_{\text{SFj}} \quad (1)$$

式中: F_{SRC} —系统总的光伏发电旋转备用容量补偿成本,万元;

P_{SRC} —电力系统备用容量单价,万元/MW;

E_j —第 j 个光伏发电厂发电出力可信度;

P_{SFj} —第 j 个光伏发电厂的预测出力,MW;

N —系统中的光伏发电厂数目。

由于储能系统对光伏出力功率的补偿和控制可提升其发电出力可靠性,由电网系统因光伏发电出力不确定性而引起的旋转备用容量补偿成本表达式可知,光伏发电出力可信度的提高可以降低电网系统中的旋转备用容量补偿成本。

2.1.2 降低AGC调频容量补偿成本和可靠性成本

储能技术在AGC调频效能方面,相比传统调频机组具有较好的优越性。目前随着新能源装置规模的迅速扩大,系统的调频压力也越来越大,相比其他类型的调频能力,储能技术能够提供快速的调频支撑^[6-7],所以未来储能技术将发挥重要的作用。

常规电池储能系统根据光伏发电系统出现短时功率波动变化时,能够对其进行快速的调节,从而降低其对电网频率波动的影响,减少电网调频容量补偿成本,这部分成本设为 F_{FMC} ^[8-10]。

$$F_{\text{FMC}} = P_{\text{FMC}} \cdot C_{\text{FM}} \quad (2)$$

式中: F_{FMC} —储能系统减少的电网调频容量补偿成本,万元;

P_{FMC} —电网系统备用调频容量的单价,万元/MW;

C_{FM} —由于储能系统减少的调频容量,MW。

为了简化计算电网的可靠性成本可用 $0 \sim P_{\text{max}}T$ 来表示光伏电站储能装置能量概率的分布,可将电站储能装置的剩余电量简化成概率分布为均匀分布,取 $0.5 P_{\text{max}}T$ 为其期望值,从而提高电能

质量,减少电网的停电事故发生率,提高供电可靠性,减少停电损失。

为了便于对供电可靠性进行分析和计算,可以将供电缺额成本与供电可靠性成本两者之间进行对等,可靠性成本见式(3)。

$$F_{\text{REL}} = 0.5P_N T \Delta A_S R_{\text{IEA}} \quad (3)$$

式中: P_N —储能装置的额定功率, MW;

T —储能装置以功率 P_N 充放电的等效持续时间, h;

ΔA_S —储能装置为电网提高的供电可靠度;

R_{IEA} —用户停电损失评价率, 万元/(MW·h)。

2.1.3 减少电网扩建成本和环境治理成本

电网网架的规划一般要根据地区电源装机容量的规划进行设计^[11]。针对负荷在不同时间段的变化将引起输电线路负载率的变化较大, 由此必须要随着负荷的增加, 适时扩建电网基础^[12], 为了能够有效利用电网输送通道容量, 可以在现有光伏电站和新建光伏电站配置一定容量储能装置, 在光伏发电高峰和低谷期适时进行充放电, 如此一来可以相对减少对电网基础的扩建成本, 还能增加其收益, 所以在光伏电站配置储能装置与相应减少电网基建产生的收益等值^[13-15]可以用 F_{dev} 来表示:

$$F_{\text{dev}} = C_d \lambda_d \eta P_N \quad (4)$$

式中: C_d —电网输电设备的单位容量造价, 万元/MW;

λ_d —电网输电设备的固定资产折旧率;

η —储能装置的储能效率, 计及并网设备的损耗和蓄电池的充放电损耗;

P_N —储能装置的额定功率, MW。

火力发电会引起大气污染, 破坏周边的生态环境。针对环境的污染, 可以借鉴国外的环境成本法^[16-17], 可以将火电发电对周边生态环境所带来的污染程度进行价值等效。配备储能装置的光伏发电站, 相对传统的纯光伏电站, 具备了能量时移调节作用, 即可以通过储能在发电高峰和低谷时对蓄电池进行充放电。这样可以使得其他的火电机组减少发电量, 减少污染物的排放, 也就为电网减少了环境污染治理成本, 在本文中只考虑了温室气体 CO_2 的治理成本, 则储能装置每年可减少

的环境治理成本^[18]为

$$F_{\text{env}} = C_e G_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

式中, C_e — CO_2 的年度单位治理成本, 元/t;

G_{CO_2} —每年储能装置可以减少 CO_2 的排放量, t。 G_{CO_2} 由目前相关国际研究数据确定, 1 kW·h 等效 0.6 kg 的 CO_2 的减排量。

2.2 算例分析

2.2.1 降低旋转备用容量补偿成本

本算例中结合示范工程项目, 光储电站总装机为 50 GW, 为简化计算, 并结合实际限定情况, 实际预测出力 P_{SEJ} 取额定装机容量的 90%, 即 45 MW。参考文献[19-22]中的计算数据, 算例中所采用的系统备用容量价格 P_{SRC} 为 0.011 2 万元/MW, 由此分析在不同光伏出力可信度下系统的旋转备用容量补偿成本^[21], 具体结果如表 1 所示。

表 1 不同光伏出力可信度对应的旋转备用容量补偿成本

光伏出力可信度/%	旋转备用容量/MW	旋转备用补偿成本/万元
70	13.5	0.151 2
75	11.25	0.126 0
80	9	0.100 8
85	6.75	0.075 6
90	4.5	0.050 4
95	2.25	0.025 2

由表 1 可以看出, 随着光储电站出力可靠性的提高, 电网中由于光伏出力不确定性而设置的旋转备用容量逐渐减少, 响应的旋转备用容量补偿成本逐渐降低。当光伏出力可信度由 70% 提高到 95% 时, 15 MW 的储能容量可以使得电网减少的旋转备用容量补偿成本约为 0.126 万元。随着储能配置容量的增加, 在旋转备用方面所能给电网带来的经济效益也就越大, 光伏电站的储能装置容量为 150 MW, 可帮助降低电网旋转备用容量补偿成本约 1.26 万元。

2.2.2 降低 AGC 调频容量补偿和可靠性成本

2.2.2.1 降低 AGC 调频容量补偿成本

本算例中结合示范工程项目, 光储电站中的储能装机容量为 15 MW, 最大储存电量为 18 MW·h, 考虑实际电网运行中的情况, 该地区水电机组和燃气机组的比例较低, 因此忽略这 2 种类型的机组, 只考虑燃煤机组作为 AGC 调频备用机组的情况。参照表 2 中的数据, 并结合储能对于传统燃

煤机组的调频替代效果约为25倍,即配置1 MW的储能在调频方面可以代替25 MW的传统AGC燃煤机组,传统AGC调频燃煤机组的价格取0.001 0万元/MW。根据以上假设前提^[22-23],分析不同容量的储能配置给电网降低的AGC调频容量补偿成本,具体结果如表2所示。

表2 不同容量的储能配置可降低的传统AGC调频
机组容量补偿成本

储能容量/MW	等效传统AGC燃煤 机组容量/MW	降低AGC调频容量 补偿成本/万元
15	375	0.375
30	750	0.75
45	1 125	1.125
60	1 500	1.5
75	1 875	1.875

由表2可以看出,通过配置储能装置,利用其响应速度快,调节效率高的特点,可以有效降低传统电网AGC机组的备用和容量补偿成本,随着储能容量的增加,所能给电网带来的经济效益也就越为可观。

2.2.2.2 降低可靠性成本

本算例中结合示范工程项目,光储电站最大的储能容量为15 MW×1.2 h。为了便于计算 T 取值为1h, R_{IEA} 取值为6万元/(MW·h)。根据以上前提条件,分析在不同供电可靠性提高量的情况下^[22-23],储能可为电网降低的可靠性成本。

表3 不同供电可靠性提高量对应的可靠性成本降低量

供电可靠性提高量/ %	挽回停电电量/ MW·h	降低可靠性成本/ 万元
0.2	0.015	0.09
0.4	0.030	0.18
0.6	0.045	0.27
0.8	0.060	0.36
1.0	0.075	0.45

2.2.3 减少电网扩建成本和环境治理成本

2.2.3.1 减少电网环境治理成本

本算例中结合示范工程项目,光储电站中的储能装机容量为15 MW,当地光照年等效可利用小时数约为1 600 h,分析储能装置的能量时移作用为光伏电站减少的不同弃光比例为电网减少的环境治理成本。 G_{CO_2} 可根据与欧洲光伏产能协会提出的研究结果来确定,即1 kW·h光伏电量等效0.6 kg的CO₂减排量,即1 MW·h的光伏发电可以

减排0.6 t的CO₂。根据以上前提条件,对减少环境治理成本进行分析,具体结果如表4所示。

表4 每年储能装置减少弃光所减少的电网环境治理成本

弃光率 减少量/%	减少火电 发电量/(MW·h)	减少CO ₂ 排放量/t	减少环境 治理成本/万元
2	1 600	960	13.44
4	3 200	1 920	26.88
6	4 800	2 880	40.32
8	6 400	3 840	53.76
10	8 000	4 800	67.20

2.2.3.2 减少环境治理成本

本算例中结合示范工程项目,并参考有关文献选择其他计算参数。光储电站中的储能装机容量额定功率 P_N 为15 MW,一次设备建设成本 C_d 为100万元/MW,电站一次设备固定资产折旧率 λ_d 为3%,储能效率 η 为80%。则该示范工程项目储能装置每年可以为电网减少的扩建成本约为36万元。

3 效果评价

从仿真结果可以明显看出光伏发电系统电储能时移作用产生的经济效益:

(1)从表1中可以看出光伏出力可信度从70%增加至95%,光伏电站配置的旋转备用容量从13.5 MW降至2.25 MW,因此节约0.126万元成本。随着储能配置容量的增加,光伏出力可信度对应的旋转备用容量补偿成本越加明显,在旋转备用方面所能给电网带来的经济效益也就越大。

(2)从表2趋势可看出,随着储能从15 MW增至75 MW,降低的AGC调频容量补偿成本从0.375万元升至1.875万元,降低了1.5万元成本。储能配置与降低传统AGC调频机组容量补偿成本成反比,随着储能容量的增加,AGC调频机组容量补偿成本呈下降趋势。

如表3所示,供电可靠度增加0.2%降低可靠性成本0.09万元,增加1%降低成本0.45万元。在相同储能配置下,供电可靠度提高,产生的可靠性成本就降低,也可推断,在储能配置越高,及运行时间越长,降低的可靠性成本累计越大。

(3)在储能增加情况下,弃光率降低,由2%增加到10%;CO₂排放可减少3 840 t,减少环境治理

成本53.76万元。因此在储能效率和储能配置确定情况下,由此每年降低的电网扩建成本显著降低。

如果在某一区域内,辐照度等条件恒定情况下,储能增加15 MW可减少电网扩建成本达36万元,在相同条件下,配置的储能容量越大,降低的环境治理成本就越大,效果就更明显。

4 结论

(1)本文提出的光伏电站储能系统产生能量时移方法,提高了光伏发电系统对电网潜在的经济效益,降低了旋转备用容量补偿成本、AGC调频容量补偿和可靠性成本及电网扩建成本和环境治理成本。

(2)随着光伏系统装机容量的增加,合理配置整个光伏系统的储能容量,储能系统的能量时移方法产生的潜在经济效益越明显,旋转备用容量补偿成本、AGC调频容量补偿和可靠性成本及电网扩建成本和环境治理产生的费用越低。

参考文献

- [1] 林卫星,文劲宇,艾小猛,等.风电功率波动特性的概率分布研究[J].中国电机工程学报,2012(1):38-46.
- [2] SCHULLER A, FLATH C M, GOTTWALT S. Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration. Applied Energy, 2015, 151:335 - 344.
- [3] TAKAGI M, IWAFUNE Y, YAMAJI K, et al. Economic value of PV energy storage using batteries of battery-switch stations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):164 - 173.
- [4] 黄欣科,王环,王一波,等.光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J].电力系统自动化,2014,03:112-117.
- [5] AQUTHAMI T, RAVINDRA H, FARUQUE M O, et al. Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of PV arrays integrated with PSS/E[C]//North American Power Symposium (NAPS). Arlington, TX, USA: [s.n.], 2010: 1-8.
- [6] SHAH R, MITHULANANTHAN N, SODE-YOME A. Impact of large-scale PV penetration on power system oscillatory stability[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [7] 张泽云,黄家栋,段晓波.光伏发电系统并网时对配电网保护的影响[J].河北电力技术,2010,29(3):17-19.
- [8] 黎永华.结合储能的并网光伏发电对电网的调峰作用分析[D].华北电力大学,北京:2012.
- [19] 董雷,周文萍,张沛,等.基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J].中国电机工程学报,2013,33(增刊):38-45.
- [10] 丁明,徐宁舟.基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J].电网技术,2011,35(1):152-157.
- [11] 毕大强,葛宝明,王文亮,等.基于钒电池储能系统的风电场并网功率控制[J].电力系统自动化,2010,34(13):72-78.
- [12] 韩涛,卢继平,乔梁,等.大型并网风电场储能容量优化方案[J].电网技术,2010,34(1):169-173.
- [13] 李碧辉,申洪,汤涌,等.风光储能联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J].电网技术,2011,35(4):123-128.
- [14] 梁亮,李建林,惠东,等.大型风电场用储能容量的优化配置[J].高压技术,2011,37(4):930-936.
- [15] 吴云亮,孙元章,徐箭,等.基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J].中国电机工程学报,2011,31(22):32-39.
- [16] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
- [17] 丁明,王波,赵波,等.独立风光柴储微网系统容量优化配置[J].电网技术,2013,37(3):575-581.
- [18] 谢石晓,杨莉,李丽娜.基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J].电网技术,2012,36(5):79-84.
- [19] 张野,郭力.基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J].电力系统自动化,2012,36(6):34-38,62.
- [20] 张坤,吴建东,毛承雄,等.基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J].电工技术学报,2012,27(10):235-241.
- [21] 蒋平,熊华川.混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J].电力系统自动化,2012,37(1):122-127.
- [22] 丁明,林根德,陈自年,等.一种适用于混合储能系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.
- [23] ISE T, KITA M, TAGUCHI A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2):1915-1918.