

复合储能系统在分布式光伏并网系统中 优化方法研究

王佳莉¹, 韩肖清¹, 姜文杰², 张显威³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024 ; 2. 华能青海发电有限公司新能源分公司, 青海 西宁 810000 ; 3. 黄河水电公司, 青海 西宁 810000)

摘要: 目前以光伏为主的可再生能源发展迅速, 在一些光伏资源较为丰富的省份, 光伏规模已经达到 20%~30%, 考虑到光伏出力特性的特殊性 & 随机性, 大规模并网后会对系统造成一定的消纳压力, 并影响系统的安全稳定运行。因此, 通常采用在光伏电站配置储能系统的方法来平抑光伏出力波动, 并提高系统对光伏的消纳能力。由此, 提出利用超级电容器储能充放电迅速、电池储能能量密度大的特点来构成复合储能系统, 并将其配置在配电网系统中作为分布式储能, 基于对其工作原理及容量优化方法的研究, 提出了电池/超级电容器储能的选址及定容优化方法。在算例中, 以某一典型配电网系统为例进行计算分析, 对需要配置的储能系统进行优化, 算例结果验证了所提出的储能优化方法的有效性 & 可行性。

关键词: 分布式光伏发电; 配电网; 复合储能; 电池储能; 超级电容器储能; 优化配置

Research on optimization method of composite energy storage system in distributed photovoltaic grid connected system

WANG Jiali¹, HAN Xiaoqing¹, JIANG Wenjie², ZHANG Xianwei³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. New Energy Branch of Huaneng Qinghai Power Generation Co., Ltd., Xining 810000, China; 3. Huang River Hydropower Development Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: At present, photovoltaic based renewable energy is developing rapidly. In some provinces with abundant photovoltaic resources, the photovoltaic scale has reached 20% ~ 30%. Considering the particularity and randomness of photovoltaic output characteristics, large-scale grid connection will have a certain impact on the power balance and safe and stable operation of the system. The method of configuring energy storage system in photovoltaic power station is usually used to balance the power and safety. Restraining the fluctuation of photovoltaic output to improve the absorption capacity of the system. Therefore, to using the characteristics of super capacitor energy storage and discharge rapidly, and the energy density of battery energy storage, a composite energy storage system is configured in the distribution network system as a distributed energy storage. Based on the research of its working principle and capacity optimization method, the location and capacity optimization method of battery/super capacitor energy storage is proposed. In the example, a typical distribution network system is taken as an example to optimize the energy storage system which needs to be configured. The results of the example verify the effectiveness and feasibility of the energy storage optimization method proposed in this paper.

Key words: distributed PV generation; distribution network; hybrid energy storage system; battery storage; super capacitor energy storage system; optimal sizing

0 引言

目前,有关在配电网系统中配置分布式储能系统以提高可再生能源利用率的研究已取得了一些研究成果。文献[1]提出了在含光伏系统中接入电池储能系统以使系统接纳光伏能力最大,并对电池容量的最优配置方法进行了研究。文献[2]提出了一种储能系统的最小容量的配置方法,但并未针对储能的选址及定容方面进行深入分析。文献[3]在建立配电网电池储能的经济效益模型的基础上,优化获得电池的充放电策略。文献[4]通过接入储能系统以减少系统的各类建设投资、停电损失等经济支出,建立了适用于不同类型储能系统的以系统整体经济性最佳的容量优化配置模型。文献[5]主要考虑了可再生能源出力对配电网安全经济运行的负面影响,对配电网中分布式储能系统的优化配置方法进行了研究。文献[6]主要从分布式电源投资及管理者的角度进行分析,采用配电网中基于多点式的储能选址定容双层优化方法,以获得系统的最优储能容量值。文献[7]主要对主动配电网中分布式储能的优化配置进行分析,但其未有结合可再生能源出力特性,而只是单独考虑储能系统的运行特性,故获得的储能容量优化结果较高,仍有下降空间。文献[8]从规划决策及运行策略两个角度出发,研究了分布式储能在主动配电网中的优化配置方法。以上针对配电网中储能系统的优化配置问题主要集中在某一种储能上,而尚未有在含分布式光伏配电网中配置复合储能的相关研究。

鉴于此,本文提出了在含分布式光伏发电的配电网系统配置复合储能系统,其由电池和超级电容器构成,利用超级电容器快速充放电特性以及电池储能能量密度大的特点来平抑光伏出力随机性及波动性。通过对复合储能系统工作原理进行分析,提出了储能系统的选址及容量优化方法。以某实际配电网系统为算例进行计算,算例结果验证了本文所提模型及储能

优化配置方法的可行性。

1 含分布式光伏配电网中电池/超级电容器复合储能的工作原理

1.1 电池/超级电容器复合储能的工作原理

将超级电容器配置在配电网的某些节点处,利用其迅速充放电特性平抑光伏功率波动,并提高系统的用电质量。利用电池储能系统配置灵活及能量密度大的特点,将其配置在配电网中参与调峰运行,以降低系统的负荷峰谷差,并改善总体负荷特性,通过配合超级电容器储能对光伏的功率平抑作用,以达到提高光伏利用率的目的。同时,复合储能系统的引入能够有效地抑制由于光伏的随机出力对配电网供电电压质量的影响,从而提高配电网各节点的电压质量。

1.2 电池储能系统的调峰运行优化方法

通过以上对复合储能系统的工作原理分析可得,电池储能接入配电网中的主要作用是参与调峰运行,减小调峰压力,改善负荷特性。考虑到电池储能系统的充放电功率调节灵活迅速,可通过调整出力保证系统的电力平衡需要。

由此,基于系统的负荷预测数据,可通过提前对电池储能的出力进行优化以分析其在配电网系统中的调峰深度,电池储能系统的功率值由负荷与负荷平均值的偏差曲线以及削峰填谷效应系数来共同确定,其表达式为

$$P_{B,t} = \sigma(L_t - \bar{L}) \quad (1)$$

式中, $P_{B,t}$ 为电池的输出功率, $P_{B,t} > 0$ 时表示电池储存电能, $P_{B,t} < 0$ 时表示电池向系统释放电能; σ 为削峰填谷效应系数; L_t 为第 t 个时段的负荷值; $\bar{L}$ 为全天负荷的平均值。

由上述分析可以获得最优的电池储能系统的功率值。所配置的电池储能系统的容量值越大,越能够显著地减小系统调峰压力。通常考虑到系统的经济性,会适当对优化获得的功率值进行缩减。

2 电池/超级电容复合储能系统的优化配置模型

对含有分布式风电电源的配电网中电池及超级电容器储能系统的接入位置和其容量的优化配置进行研究,再通过各储能配置方案进行经济性评估,以获得储能系统的最优配置方案。

2.1 目标函数

复合储能优化配置模型的目标函数为系统的总成本,考虑到储能系统的运行年限,全部将成本折算为投资等年值,即

$$\min I = I_{\text{INV}} + I_{\text{LOSS}} + I_{\text{DG}} + I_{\text{TR}} + I_{\text{PUN}} \quad (2)$$

式中, I 为系统的总成本; I_{INV} 为储能系统投资成本; I_{LOSS} 为配电网网损成本; I_{DG} 为分布式光伏电源提供无功功率的成本; I_{PUN} 为由于光伏并网功率波动率越限产生的补偿成本。

(1) 储能系统的投资费用

电池及超级电容器系统的投资费用主要由储能的功率及电量容量决定,即

$$I_{\text{INV}} = I_{\text{B}} + I_{\text{SC}} \quad (3)$$

$$I_{\text{B}} = (\pi_{\text{B}}^{\text{P}} P_{\text{B}} + \pi_{\text{B}}^{\text{E}} E_{\text{B}}) \cdot \text{CRF}(r, Y_{\text{B}}) \quad (4)$$

$$I_{\text{SC}} = (\pi_{\text{SC}}^{\text{P}} P_{\text{SC}} + \pi_{\text{SC}}^{\text{E}} E_{\text{SC}}) \cdot \text{CRF}(r, Y_{\text{SC}}) \quad (5)$$

式中, I_{B} 为电池储能系统的投资费用; I_{SC} 为超级电容器储能系统的投资费用; $\pi_{\text{B}}^{\text{P}}$ 、 $\pi_{\text{B}}^{\text{E}}$ 分别为安装电池与功率及容量单位费用; P_{B} 、 E_{B} 分别为电池储能系统的额定功率及额定电量; $\pi_{\text{SC}}^{\text{P}}$ 、 $\pi_{\text{SC}}^{\text{E}}$ 分别为安装超级电容器储能系统与功率及容量单位费用; P_{SC} 、 E_{SC} 分别为超级电容器储能系统的额定功率及额定电量; $\text{CRF}(r, Y)$ 为等年值系数; r 为贴现率; Y_{B} 、 Y_{SC} 分别为电池及超级电容器的寿命年限。

(2) 配电网网损费用

主要计算各时段配电网各条线路的网损费用,即

$$I_{\text{LOSS}} = 365 \times \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{t=1}^T (\pi_{\text{LOSS},l,t} P_{\text{LOSS},l,t} \Delta T_p) \quad (6)$$

式中, $\pi_{\text{LOSS},l,t}$ 为第 t 个时段的单位网损费用; $P_{\text{LOSS},l,t}$ 为系统第 l 条线路第 t 个时段的网损值; ΔT_p

为每个时段的时间长度; N_l 为系统线路总数。

(3) 提供无功费用

光伏发电机组在向电网提供无功功率时会引起系统的损耗增加,需要计及各时段内配电网各节点接入的分布式风电电源所提供的无功功率费用,即

$$I_{\text{DG}} = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T (\pi_{\text{DG},k,t} Q_{\text{DG},k,t} \Delta T_p) \quad (7)$$

式中, N_w 为分布式光伏电源的数目; $\pi_{\text{DG},k,t}$ 为第 t 个时段分布式电源提供无功功率的单位费用; $Q_{\text{DG},k,t}$ 为系统第 k 个分布式光伏电源在第 t 个时段提供的无功功率值。

(4) 功率补偿费用

由于光伏出力的高频波动并入电网后严重影响电网的安全稳定运行,若系统的总体调节能力有限,则将增加系统安全运行风险,以功率补偿费用对该部分未能被平抑的风电高频分量带来的影响进行经济性衡量,其表达式为

$$I_{\text{PUN}} = \sum_{n=1}^{N_s} \pi_{\text{PUN}} dP_{\text{PV}} \Delta T_s \quad (8)$$

式中, π_{PUN} 为功率补偿成本费用系数; dP_{PV} 为光伏功率超出要求的差值; ΔT_s 为采样周期。

2.2 约束条件

(1) 分布式光伏电源出力约束

$$P_{\text{PV}}^{\min} \leq P_{\text{PV},t} \leq P_{\text{PV}}^{\max} \quad (9)$$

式中, $P_{\text{PV},t}$ 为分布式光伏电源在 t 时段的发电功率; $P_{\text{PV}}^{\min}$ 、 $P_{\text{PV}}^{\max}$ 分别为分布式光伏电源的最小和最大发电功率。

(2) 系统节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (10)$$

式中, $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ 为节点 i 电压的下限及上限值。

(3) 电池储能系统的运行约束

$$\max(-P_{\text{B}}^{\text{N}}, \frac{(E_{\text{B},n} - E_{\text{B}}^{\text{N}})}{T_s} \eta_{\text{B,d}}) \leq P_{\text{B},n} \leq \min(P_{\text{B}}^{\text{N}}, \frac{E_{\text{B},n} - E_{\text{B}}^{\min}}{T_s \eta_{\text{B,c}}}) \quad (11)$$

$$E_{\text{B},n} = E_{\text{B},n-1} + T_s (P_{\text{B},n}^{\text{act}} \eta_{\text{B,c}} + \frac{P_{\text{B},n}^{\text{act}}}{\eta_{\text{B,d}}}) \quad (12)$$

$$E_{\text{B}}^{\min} \leq E_{\text{B},n} \leq E_{\text{B}}^{\text{N}} \quad (13)$$

式中, $P_{B,n}$ 为电池储能系统在 n 时刻的出力功率, $P_{B,n} > 0$ 时为充电, $P_{B,n} < 0$ 时为放电; $E_{B,n-1}$ 和 $E_{B,n}$ 分别为电池在第 $n-1$ 和第 n 个采样时刻的电量容量值; $\eta_{B,c}$ 、 $\eta_{B,d}$ 分别为电池充电和放电效率; P_B^N 为电池储能额定功率; $E_B^{\min}$ 为电池最小电量容量值。

(4) 超级电容器储能系统的运行约束

超级电容器的运行约束条件同样包含出力及电量平衡约束两类, 与上述电池储能的约束一致, 在此不再赘述。

2.3 模型求解方法

复合储能系统的优化配置主要从电池及超级电容器储能系统的选址、容量优化两方面进行分析。具体的优化求解方法为确定一组储能接入方案, 对该方案下的各个节点所需接入储能系统的容量值进行优化, 计算系统的总成本。不断改变系统接入位置, 最终即可获得使系统总成本最小的复合储能系统最佳接入位置及最优配置容量值。

3 算例分析

本算例选取一个含分布式光伏接入的实际配电网系统进行计算分析, 如图1所示。

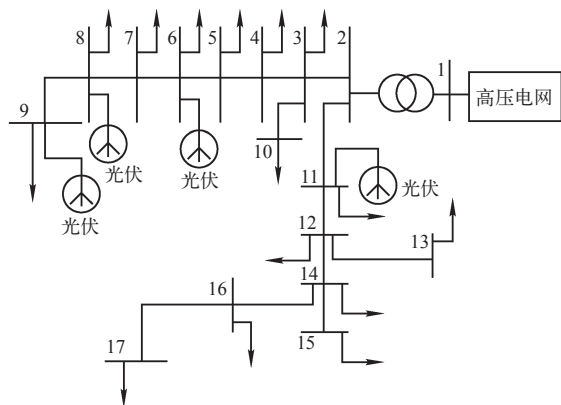


图1 算例系统结构拓扑图

Fig. 1 The topology graph of test network structure

配电网负荷数据及线路数据参见文献[9], 系统常规的负荷备用率取为0.2。每个分布式光伏电源容量为0.5 MW。

3.1 超级电容器储能优化出力

基于对光伏及负荷曲线的分析, 获得超级

电容器储能系统的优化出力曲线, 如图2所示。

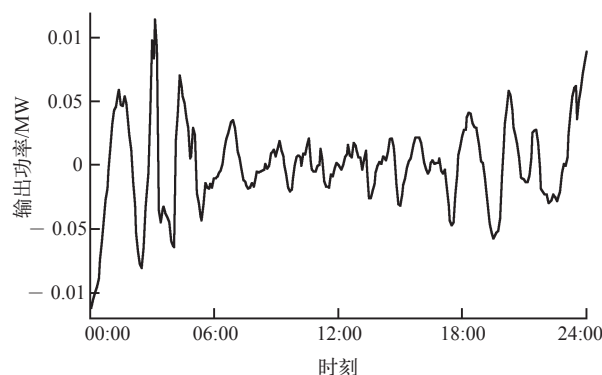


图2 超级电容器储能系统日出力曲线

Fig. 2 The daily output curve of the super capacitor energy storage system

3.2 复合储能系统的优化配置结果

对电池及超级电容器储能的容量进行优化, 获得储能系统的优化配置结果及全年的各项费用详细结果, 如表1、表2所示。

表1 储能系统优化配置结果

Tab. 1 Optimal configuration results of the hybrid energy storage systems

配置 方式	配置 方案		运行参 数	
	节点 位置	P_{sc}^N/E_{sc}^N [MW/ (MW·h)]	P_B^N/E_B [MW/ (MW·h)]	$\Delta U(\%)$ $\Delta P(\%)$
无 储 能	—	—	—	3.12 27.8
	6	0.08/0.16	2/8	
含 储 能	8	0.1/0.2	—	
	9	0.1/0.2	—	1.67 4.2
	11	0.1/0.2	—	
	13	0.08/0.2	—	

表2 系统成本计算结果

Tab. 2 Calculation results of the costs

(单位: 万元)

各项成本	无储能	含储能
I_{LOSS}	132.8	134.4
$I_{Q,DG}$	256	251
I_{ESS}	—	15
I_{PA}	125	121
I_{PUN}	119	0
I	632.8	521.4

根据表1及表2的优化结果可以看出:

1) 在分布式光伏电源并入电网后, 系统电压波动率最大值达到3.12%。为系统配置储能系

统后,各节点的电压波动指标得到了明显改善。

2) 由储能系统优化配置结果可得,为系统配置电池储能可很好地参与系统的调峰运行,由此验证了电网配置超级电容器储能的有效性。

4 结束语

为了提高光伏在配电网中的消纳能力,本文提出了在含大规模分布式光伏电源的配电网中配置由电池/超级电容器储能构成的复合储能系统的容量优化模型。

1) 对由电池/超级电容器储能构成的复合储能系统在含分布式光伏配电网中的工作原理进行分析,充分发挥超级电容器储能系统充电迅速的特点,使其用于平抑风电功率波动;利用电池能量密度大的特点参与系统调峰,达到提高系统运行安全及经济性的目的。

2) 分别从分布式储能系统的选址、定容两个方面进行分析,提出了复合储能系统的优化配置模型。算例分析结果验证了本文所提方法及模型的有效性及其可行性。

参考文献

- [1] 吴文宣. 不同类型分布式电源在配电网中的优化布置[J]. 现代电力, 2012, 29(3): 6-11.
- [2] ATWA Y M, EL-SAADANY E F. Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (4): 1815-1822.
- [3] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
- [4] 胡荣, 任锐焕, 杨帆, 等. 配电网中储能系统优化配置研究[J]. 华东电力, 2014, 42(2): 345-349.

- [5] 唐文左, 梁文举, 崔荣, 等. 配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 电力建设, 2015, 36(4): 38-45.
- [6] 陶琼, 桑丙玉, 叶季蕾, 等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2158-2165.
- [7] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
- [8] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [9] CARPINELLI G, CELLI G, MOCCI S, et al. Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 985-995.

作者简介



王佳莉

王佳莉(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为配电网储能规划。

韩肖清(1964—),女,教授、博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、新能源与微电网运行。

姜文杰(1992—),男,工程师,主要从事光伏电站运维、检修工作。

张显威(1981—),男,工程师,主要从事光伏电站运行维护管理工作。

(收稿日期: 2020-03-30) **EA**