

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.08.009

区域电网分布式储能选址定容规划

部 宁¹, 张慧媛², 王子琪², 许 军², 程杰慧², 高荣刚¹, 赵建平¹

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830000; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 分布式储能是解决新能源并网问题的有效手段, 分布式储能的选址定容将影响储能系统效率、系统网损及投资成本等, 因此有必要对分布式储能进行选址定容规划。文中提出一种分布式储能选址定容规划, 具体策略是以电压稳定裕度为指标, 选出部分系统电压稳定性弱的节点, 进行预选址; 然后在考虑储能设备充放电状态的基础上, 针对负荷日特性曲线, 设定储能系统的调度策略; 并考虑负荷、风电、光伏时序特性, 以有功网损为目标函数, 利用粒子群算法寻优, 优化储能充放电功率; 最终确定分布式储能设备的位置及容量。文章最后采用新疆吐鲁番地区实际数据进行仿真, 结果表明, 分布式储能的接入可有效提高电压稳定性, 降低系统网损, 平抑负荷波动问题。

关键词: 分布式储能; 预选址; 选址定容; 粒子群算法

Planning for Site Selection and Capacity Determination of Distributed Energy Storage in Regional Power Grid

GAO Ning¹, ZHANG Huiyuan², WANG Ziqi², XU Jun², CHENG Jiehui², GAO Ronggang¹,
ZHAO Jianping¹

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Urumqi 830000, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Distributed energy storage is an effective way to solve the problem of new energy grid connection. The site selection and capacity determination of distributed energy storage will affect the efficiency, network loss and investment cost of the energy storage system, so it is necessary to plan the site selection and capacity determination of distributed energy storage. This paper proposes a site selection and capacity determination planning of distributed energy storage, in which the voltage stability margin is taken as the index to select some nodes with weak system voltage stability for pre-selection, then scheduling strategy of the energy storage system is set according to the daily characteristic curve of load with consideration of the charging and discharging states of the energy storage equipment. The time series characteristics of load, wind power and photovoltaic power are considered, the active power transmission loss is taken as the objective function, and the particle swarm optimization algorithm is used to optimize the charging and discharging power of the energy storage system. Finally the site and capacity of distributed energy storage equipment are determined. In addition, simulation is performed with the actual data of Turpan in Xinjiang, and the results show that switching-in of distributed energy storage system can effectively improve the voltage stability, reduce the network loss, and suppress the load fluctuation.

Key words: distributed energy storage; pre-selection of site; site selection and capacity determination; particle swarm optimization

0 引言

近年来, 大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显, 中国以风能和太阳能为主的

可再生能源发电得到迅速发展。但风、光伏发电具有随机性、间歇性等特点, 给电网稳定运行带来了新问题。储能技术能够显著提高可再生能源的消纳水平, 为电网运行提供调峰调频、需求响应等多种

收稿日期: 2020-02-21; 修回日期: 2020-04-06

基金项目: 国网新疆电力有限公司研究项目(5230DK80018)。

Project Supported by State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.(5230DK80018).

服务^[1-3]。针对电网侧多点布置的分布式储能具有能源利用率高、环境污染小、安装地点灵活等优点,与集中式储能相比较,节省了输配电资源和运行费用,同时降低了输配电过程中的线路损耗^[4]。但目前储能成本仍然较高,储能系统接入电网会影响网络潮流、电能质量和系统可靠性。对分布式储能选址定容进行合理规划,则能够提高储能系统的效率,改善系统网损,降低电压波动,平抑新能源带来的负荷波动^[5-7]。因此,有必要对分布式储能的接入位置及容量进行规划。

目前,国内外学者对分布式储能选址定容研究主要分为布点规划及容量配置两部分,当前还没有相对成熟和系统的研究成果。文[8-9]以削峰填谷和平滑负荷为目标,对储能进行容量配置,可平滑负荷,但未考虑储能的选址分布;文[10]通过计算网损灵敏度来优化储能接入的位置和容量,减少配电网功率损耗,但其未考虑储能接入后系统电压稳定性问题;文[11]通过计算等效网损微增率指标,确定储能最优安装位置,然后以网损、电压改善程度和环境改善程度为目标进行优化从而确定最终储能容量,但其将选址与定容分开计算,其未考虑到选址与定容相互耦合的关系,先选址后定容会造成结果的不准确;文[12]以系统节点电压波动、负荷波动以及储能系统总容量为目标建立了分布式储能位置和容量配置的优化模型,进行求解,由于同时进行选址定容,所以对于大规模系统计算规模大、耗时较长;文[13-14]以储能接入系统后净收益最大、成本最小为目标,获得储能安装位置及容量,但在计算中将负荷等效为固定模型,未考虑负荷出力的波动性。文中采用预选址规划策略,可更好提高系统整体电压的稳定性,筛选出部分节点再进行选址定容,可有效简化计算规模,同时保证结果的精确性,适用于实际中多节点系统的规划需求。

文中以新疆吐鲁番地区进行仿真建模,首先以电压稳定裕度为指标,选出部分系统电压稳定性弱的节点,进行预选址;然后在考虑储能设备充放电状态的基础上,针对负荷日特性曲线,设定储能系统的调度策略;并考虑负荷、风电、光伏时序特性,以有功网损为目标函数,利用粒子群算法寻优,优化储能充放电功率;最终确定分布式储能设备的位置及容量,完成储能规划配置。结果表明,分布式储能的接入可有效提高电压稳定性,降低系统网损,平抑负荷波动问题。

1 分布式储能预选址规划

电压稳定裕度是指系统从当前状态出发,不断

增加功率或负荷直至到达电压崩溃的临界点,用当前运行点与电压临界点间的距离来衡量电压稳定的水平,称为电压稳定裕度指标^[15],表达式为:

$$U_{\text{margin}}(i) = \frac{U_0(i) - U_{\text{cr}}(i)}{U_0(i)} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: $U_{\text{margin}}(i)$ 为节点 i 电压稳定裕度指标; $U_0(i)$ 为节点 i 当前状态的电压值; $U_{\text{cr}}(i)$ 为节点 i 的临界电压值。

采用连续潮流法,从系统初始运行点开始,逐步增大负荷,通过修正潮流方程,进行校正和步长控制,得到 PU (功率—电压)曲线,求出各节点电压稳定的临界值^[16-17]。典型 PU 曲线见图 1。

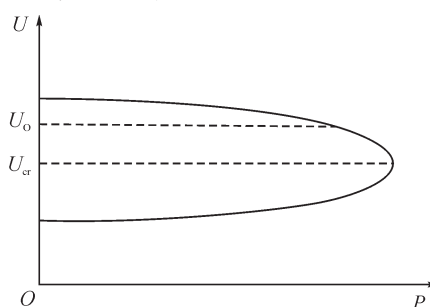


图 1 PU 曲线图

Fig. 1 PU curve

对于同一系统不同节点,其电压临界值对应的负荷功率变化率相同。在相同的负荷功率变化率时,电压幅值的变化量大的节点更容易发生电压越限的情况,为容易发生电压不稳定的节点。因此,在同一系统中,电压稳定裕度大的节点为电压稳定性弱的节点^[18]。

分布式储能接入系统后,可平滑系统功率波动,通过调度实现合理的充放电从而减小电压偏差,使电压更稳定。因此,将分布式储能安装在系统电压稳定性弱的节点处,可更好提高系统电压稳定性。

将筛选出的部分节点,再进行选址定容规划,从而可简化计算模型,降低运算维度,缩小整体的计算时间,提高了求解效率。

2 分布式储能选址定容规划

2.1 目标函数

系统在某时刻有功网损表达式为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^b R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \quad (2)$$

式(2)中: P_{loss} 为系统有功网损; b 为总支路数; R_j 为支路 j 的电阻; P_j 、 Q_j 分别为支路 j 的有功、无功功率; U_j 为支路 j 末端电压幅值。

由于负荷及风光电源均具有波动性,使用某时刻网损值作为目标进行规划并不准确。文中将考虑负荷、风电、光伏的时序特性,以一个典型日总网损为目标函数进行选址定容规划。系统在一段时间 T 内总网损表达式为

$$P'_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^T P_{\text{loss}}(k) \quad (3)$$

式(3)中: P'_{loss} 为系统在时间 T 内总有功网损; T 为总时刻数; $P_{\text{loss}}(k)$ 为 k 时刻系统的有功网损。

储能设备在系统中具有充、放电两个状态,其充放电状态模型不一致,因此不能在潮流计算时仅将储能等效为恒定的模型进行仿真分析。储能可在负荷低谷时进行充电,线路电流会升高,损耗增加;在负荷高峰时进行放电,线路电流会降低,损耗减少。整体来说,当在合理的位置安装分布式储能时,可以达到降损的效果。

2.2 约束条件

考虑到系统安全稳定的运行,及储能自身运行状态限制,需要进行如下约束:

1)节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (4)$$

式(4)中: $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为系统节点 i 电压上下限。

2)储能功率约束

$$P_{\text{store_min}} \leq P_{\text{store}} \leq P_{\text{store_max}} \quad (5)$$

式(5)中: P_{store} 为储能单次充放电功率; $P_{\text{store_max}}$ 、 $P_{\text{store_min}}$ 分别为储能功率上下限。

3)储能数量约束

$$N_{\min} \leq N_{\text{store}} \leq N_{\max} \quad (6)$$

式(6)中: N_{store} 为储能安装数量; $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$ 为储能最大、最小安装数量。

4)功率平衡约束

$$P_s = \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} P_{\text{load}i} - \sum_{j=1}^{N_{\text{WT}}} P_{\text{WT}j} - \sum_{k=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV}k} - \sum_{m=1}^{N_{\text{store}}} P_{\text{store}m} \quad (7)$$

式(7)中: P_s 为电网输入功率; $P_{\text{load}i}$ 为节点 i 的负荷功率; $P_{\text{WT}j}$ 为风电机组 j 的输出功率; $P_{\text{PV}k}$ 为光伏机组 k 的输出功率; $P_{\text{store}m}$ 为储能系统 m 的出力,充电时为正。

2.3 储能容量配置

系统安装储能时需要考虑成本因素,因此以1个调度周期内分布式储能系统最大充/放电容量作为储能最终额定容量。

一个调度周期内储能系统最大充/放电容量为

$$E_{\text{store}} = \max \left\{ \sum_{t=t_1}^{t_2} |P_{\text{store}t}| \cdot \Delta t, \sum_{t=t_3}^{t_4} |P_{\text{store}t}| \cdot \Delta t, \dots, \sum_{t=t_{r-1}}^{t_r} |P_{\text{store}t}| \cdot \Delta t \right\} \quad (8)$$

式(8)中: t_1-t_2 , t_3-t_4 , $t_{r-1}-t_r$ 为连续充/放电时间段; Δt 为两时刻之间的时间间隔。

储能总容量为

$$E'_{\text{store}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{store}}} E_{\text{store}m} \quad (9)$$

式(9)中: $E_{\text{store}m}$ 为第 m 个储能系统容量。

3 优化算法及流程

粒子群算法是一种基于群体的随机优化技术,具有群体智能、迭代格式简单等优点,广泛应用于电力系统中的电网规划、无功优化、负荷分配等领域^[19-20]。

在粒子群算法中,建立初始种群需要对分布式储能的位置及容量进行编码,种群中每个个体用一串二进制数来编码,表示一种选址定容规划。在储能接入个数大于1时,将逐步增加储能接入个数,直到达到储能允许安装的最大个数,分别计算出不同储能安装个数时的最优解。比较不同储能个数下的最优解,得到最终规划方案。

综上,文中基于粒子群算法对分布式储能选址定容规划的具体步骤见图2。

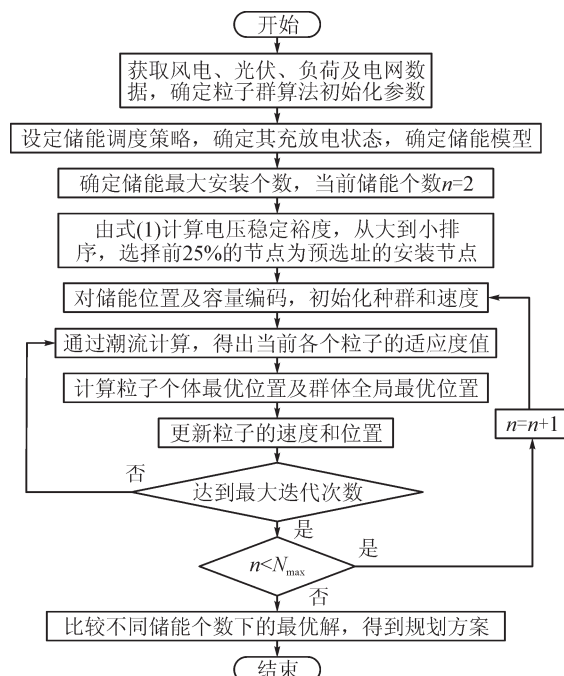


图2 分布式储能选址定容规划流程图

Fig. 2 Flow chart of distributed energy storage site selection and capacity planning

4 算例仿真

4.1 算例介绍

文中选用新疆吐鲁番地区实际电网系统进行仿真,其地区电网结构见图3。系统负荷最大值为 $1\,907.64\text{ MW}+\text{j}718.56\text{ Mvar}$ 。其电网冬季某日日负荷特性曲线见图4。系统中有16个风电,共 $1\,387\text{ MW}$,

分别位于节点2、3、4、5、7、13、14、17、18、19、20、23、27、107、108、109;系统中有5个光伏电站,共 660 MW ,分别位于节点49、50、51、61、91。其中风电2、光伏49的冬季某日日特性曲线见图5。考虑地区规划及分布式储能成本,设定分布式储能接入个数2至4个,总储能安装容量不超过 80 MWh 。

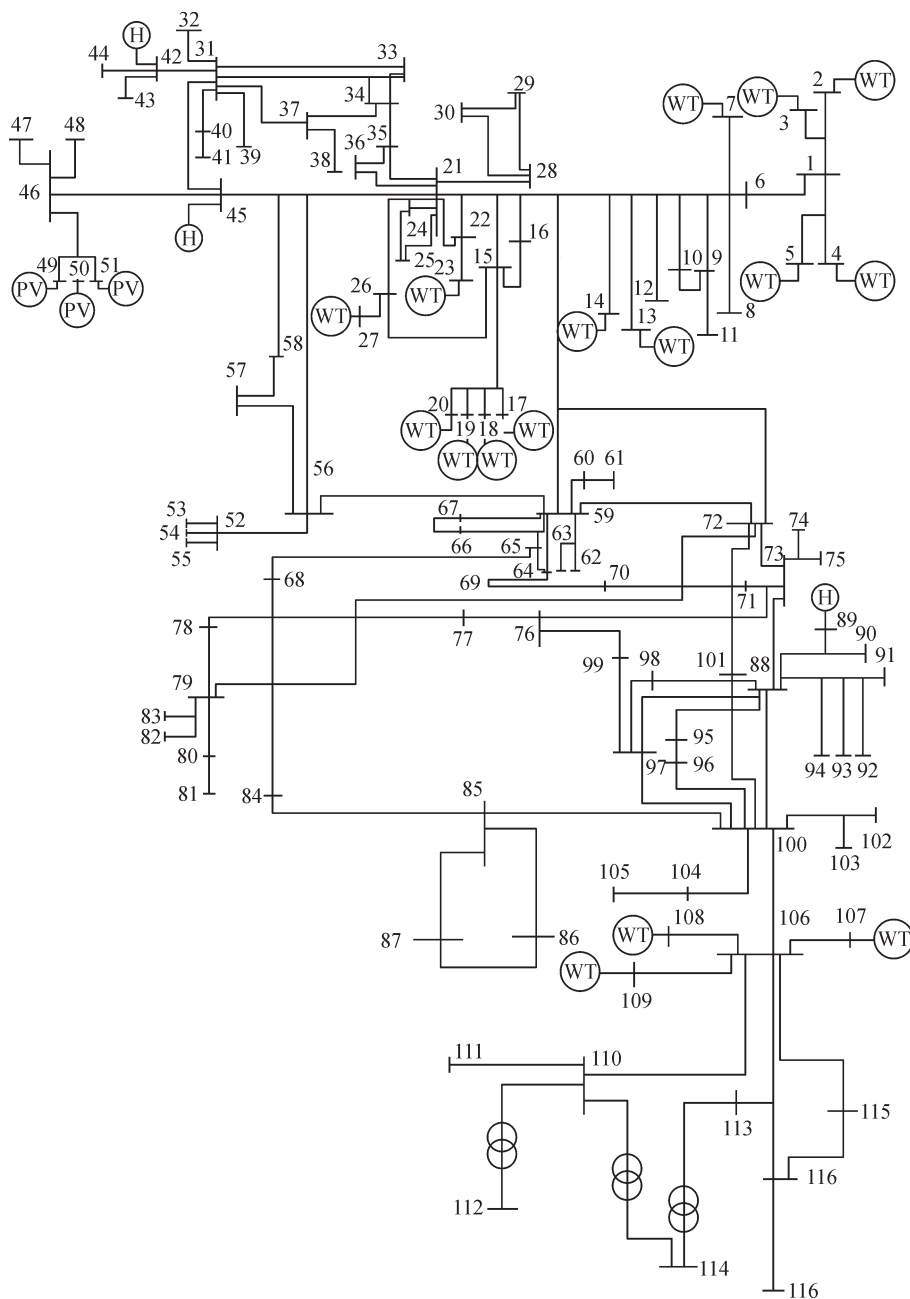


图3 吐鲁番地区电网结构图

Fig. 3 Power grid topology of Turpan region

4.2 分布式储能预选址

在此算例中,节点45为平衡节点,将不考虑安装储能。分布式储能允许安装节点为节点1~44及46~117,对于这些节点,采用第1节中所述方法,计算出各节点电压稳定裕度,确定系统电压稳定性弱

的节点。各节点电压稳定裕度指标见图6。由图6可得,节点81的电压稳定裕度指标最大,节点44的电压稳定裕度指标最小。将电压稳定裕度指标由大到小进行排序,选择前25%的节点,因此选择下列29个节点作为预选的安装分布式储能的节点,即

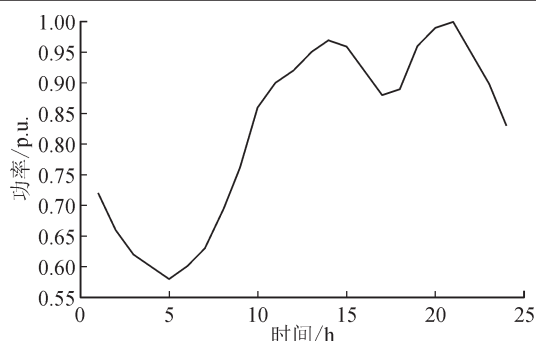


图4 日负荷特性曲线图

Fig. 4 Daily load characteristic curve

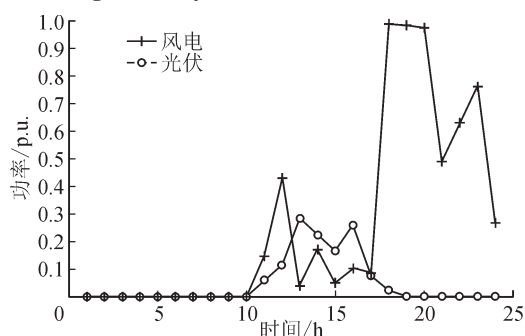


图5 风电、光伏日特性曲线图

Fig. 5 Daily characteristics of wind power and photovoltaic

节点81、80、53、55、54、52、57、56、15、16、62、63、67、69、70、64、65、68、17、9、10、66、11、8、20、19、59、18、12。

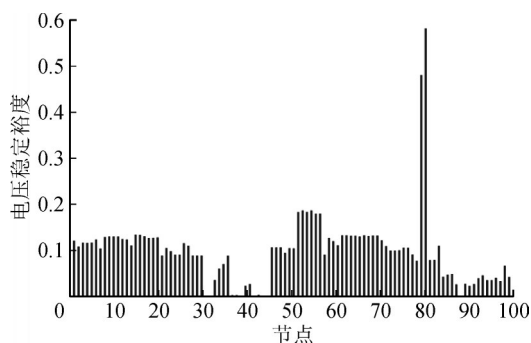


图6 各节点电压稳定裕度指标

Fig. 6 Voltage stability margin index of each node

4.3 分布式储能选址定容配置

根据系统日负荷曲线及风光数据,可在仿真中将储能系统的调度策略设定为:储能电池在16至17时及17至18时两阶段进行充电,在22至23时及23时至24时两阶段进行放电,其余时间储能电池与系统将不发生能量交换。在此调度方案下,进行预选址后,以一天总有功网损为目标,运用粒子群算法寻优,设定种群个数为100,迭代次数为300,其仿真结果见表1。

由表1结果可知,比较不同储能个数下的网损值,最终分布式储能选址定容规划方案为:储能设

表1 分布式储能接入方案规划

Table 1 Planning of distributed energy storage access schemes

规划方案	分布式储能安装个数	一天总有功网损/MW	接入位置	接入容量/(MWh)
	0(未安装)	570.115 8	—	—
预选址	2	550.723 6	17	40.000 0
			18	39.791 2
			17	25.775 5
	3	550.808 2	18	18.445 8
			20	32.537 2
			17	14.005 6
	4	550.602 6	18	21.124 2
			19	19.148 1
			20	19.816 6

备在节点17、18、19、20处接入,接入容量分别为14.005 6、21.124 2、19.148 1、19.816 6 MWh总容量为74.094 6 MWh。此时一天总有功网损为550.602 6 MW,较未安装储能前降低了3.42%。

因此,通过合理规划分布式储能的位置和容量,可以减少配电网的网络损耗。由于分布式储能充电时,系统总网损将增加,放电时,系统总网损将降低,且一个调度周期内分布式储能充放电需要保持平衡,因此,储能接入后一个调度周期内系统总网损较储能接入前减少程度不明显,且在储能总容量一定时,不同储能安装个数对网损的影响不大。

在同一负荷变化率下,分布式储能安装前后各节点电压稳定裕度见图7。由图7可知,分布式储能的接入会使系统节点电压稳定裕度降低,即在负荷改变时,电压变化将减少,系统电压更不容易越限。因此,分布式储能的接入可有效改善电压水平,提高系统电压稳定性。

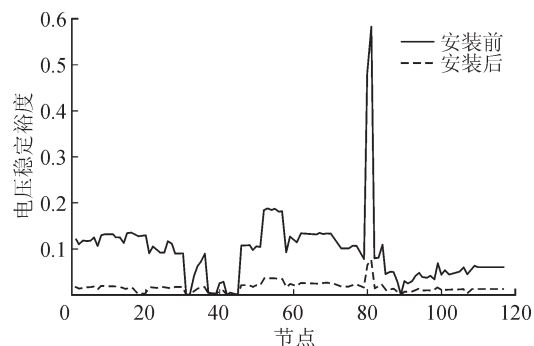


图7 分布式储能安装前后电压变化率变化情况

Fig. 7 Change of voltage change rate before and after installation of distributed energy storage

储能接入前后的日负荷曲线见图8。由图8可

知,分布式储能系统接入后,系统的负荷波动出现了降低,说明储能系统可抑制系统负荷波动。由于储能总容量只占吐鲁番区域日负荷的4.2%,因此,负荷整体平抑不明显。

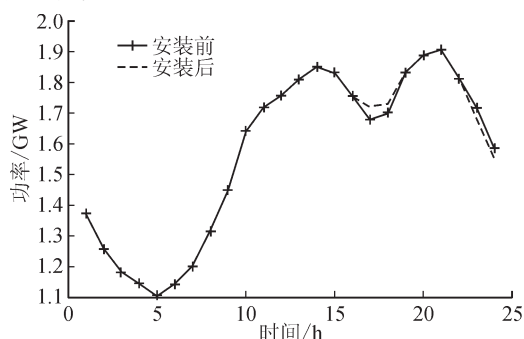


图8 分布式储能安装前后负荷日特性曲线图

Fig. 8 Daily load characteristic curve before and after distributed energy storage installation

一个调度周期内储能功率曲线图见图9。由图9可看出,在充电阶段时,分布式储能转移的负荷为74.094 6 MW;在放电阶段时,分布式储能转移的负荷为65.481 1 MW。因此,安装分布式储能可有效的削峰填谷,消纳风光电源,降低负荷波动。

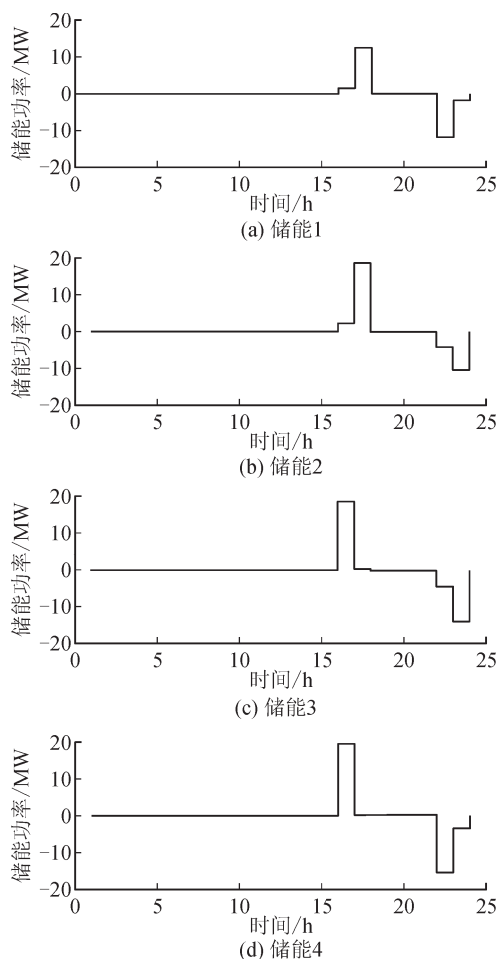


图9 分布式储能功率曲线图

Fig. 9 Distributed energy storage power curve

5 结论

文中提出了一种分布式储能选址定容规划,规划中考虑储能设备的充放电状态,针对典型负荷日特性曲线,设定储能的调度策略;在考虑负荷、风电及光伏的时序特性基础上,以系统一天内总网络损耗最小为目标,综合考虑节点电压、储能功率、功率平衡等约束,利用粒子群算法优化,以新疆吐鲁番地区为模型,仿真建模,确定了分布式储能位置及容量配置。得出结论如下:

1)以电压稳定裕度为指标,选择电压稳定裕度较大节点即系统电压稳定性弱的节点安装分布式储能,可有效提高系统整体电压稳定性,同时通过预选址这一步可有效减少整体计算规模,提高求解效率。

2)与未安装储能相比,安装储能后有利于降低系统网损,提高系统电压稳定性,平抑风光电源并网带来的系统负荷波动问题。

3)对于实际电网进行建模仿真,其网络节点众多,预选址方案与考虑所有可行点的方案相比,有利于系统电压稳定性,且简化了计算模型,降低整体运算维度,对于大系统更具有优越性,更符合实际规划需求。

参考文献:

- [1] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [2] 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 Shanghang, XI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [3] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术,2017,41(11):3470-3479.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. An overview of operation and configuration of energy storage systems for smoothing wind power outputs[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3470-3479.
- [4] GRANT A, IGOR E, MICHELLE G, et al. The economics of distributed energy generation: A literature review[J]. Re-

- newable & Sustainable Energy Reviews, 2015(42):543-556.
- [5] FERNANDEZ-BLANCO R, DVORKIN Y, XU Bolun, et al. Optimal energy storage siting and sizing: A WECC case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2):733-743.
- [6] 刘胜永, 张 兴. 新能源分布式发电系统储能电池综述[J]. 电源技术, 2012, 36(4):601-605.
LIU Shengyong, ZHANG Xing. Survey on energy storage battery in renewable energy distributed generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(4):601-605.
- [7] NAGARAJAN A, AYYANAR R. Design and strategy for the deployment of energy storage systems in a distribution feeder with penetration of renewable resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1085 - 1092.
- [8] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1019-1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1019-1025.
- [9] 夏新茂, 关洪浩, 丁鹏飞, 等. 基于改进型量子遗传算法的储能系统容量配置与优化策略[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(3):551-558.
XIA Xinmao, GUAN Honghao, DING Pengfei, et al. Capacity allocation and optimization strategy of an energy storage system based on an improved quantum genetic algorithm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 551-558.
- [10] SRINIVAS B K, DAVID X, VENKATESH B, et al. Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources[C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.[S.l.]: IEEE, 2013: 4553-4558.
- [11] 郑漳华, 艾 芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13):23-28.
ZHENG Zhanghua, AI Qian, GU Chenghong, et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23-28.
- [12] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12):3405-3411.
- [13] ZHENG Yu, DONG Zhaoyang, LUO Fengji, et al. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):212-220.
- [14] 宋柄兵, 顾 洁. 考虑电网输电能力改善的超导储能装置优化选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11):92-98.
SONG Bingbing, GU Jie. Optimal locating and sizing of superconducting magnetic energy storage device for transfer capability improvement of power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(11):92-98.
- [15] 郑飞平. 静态电压稳定临界值的求取方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
ZHENG Feiping. Research on calculation method of critical values of static voltage stability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [16] 王卓欣, 李禹鹏. 电力系统电压稳定分析方法综述[J]. 电力与能源, 2014, 35(3):295-301.
WANG Zhuoxin, LI Yupeng. Analysis methods for power system voltage stability[J]. Power & Energy, 2014, 35(3): 295-301.
- [17] 王成山, 魏 炜. 一种改进的步长控制连续性潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2):58-63.
WANG Chengshan, WEI Wei. An improved continuation method with controlled step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2):58-63.
- [18] 安天瑜, 周苏荃. 一种电压薄弱负荷节点群的戴维南等值参数跟踪方法研究[J]. 继电器, 2007, 35(24):21-25.
AN Tianyu, ZHOU Suquan. Research on a weak voltage node group's Thevenin equivalents tracing method[J]. Relay, 2007, 35(24):21-25.
- [19] 黄少荣. 粒子群优化算法综述[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(8):1977-1980.
HUANG Shaorong. Survey of particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(8):1977-1980.
- [20] 张利彪, 周春光, 马 铭, 等. 基于粒子群算法求解多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1286-1291.
ZHANG Libiao, ZHOU Chunguang, MA Ming, et al. Solving multi-objective optimization problems based on particle swarm optimization[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(7):1286-1291.
- 郜 宁(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源储能方向研究(E-mail:gaoning1014@163.com)。
- 张慧媛(1963—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为直流微电网与储能技术(通讯作者)(E-mail:zhyseunj@aliyun.com)。
- 王子琪(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及储能研究。