

改善低压农网电压质量的分布式光伏 - 储能系统优化配置方法

王浩宁¹, 黄明¹, 韩俊峰², 徐海栋¹, 李毅¹, 张雷¹, 张建林¹, 王浩粼¹, 谭力¹, 杜向阳²

¹国网重庆市电力公司武隆供电分公司, 重庆

²重庆峰极智能科技研究院有限公司, 重庆

收稿日期: 2022年11月26日; 录用日期: 2022年12月16日; 发布日期: 2022年12月28日

摘要

低压农网配电线路不仅较长而且呈现出辐射状, 在用电高峰期, 部分配变低压侧经常出现电压过低的现象, 电压质量问题突出。为解决上述问题, 本文提出一种基于光伏和储能的电压质量改善方法。该方法以整个建设周期经济收益最大化为目标, 考虑储能运行约束、节点电压约束等相关约束, 采用蚁群算法求解分布式光伏 - 储能系统, 建立了农网光伏 - 储能低电压治理的优化模型, 最后通过IEEE-33节点为例进行验证。结果表明, 光伏 - 储能系统能够在改善农网末端电压质量的基础上, 增加整个配电网系统的经济收益, 相比于无光伏储能系统更具备经济优势。

关键词

低压电网, 光伏, 储能, 蚁群算法

Optimal Allocation Method of Distributed Photovoltaic Energy Storage System to Improve Voltage Quality of Low Voltage Rural Grid

Haoning Wang¹, Ming Huang¹, Junfeng Han², Haidong Xu¹, Yi Li¹, Lei Zhang¹, Jianlin Zhang¹, Haolin Wang¹, Li Tan¹, Xiangyang Du²

¹State Grid Chongqing Electric Power Company Wulong Power Supply Branch, Chongqing

²Chongqing Fengji Intelligent Technology Research Institute Co. Ltd., Chongqing

Received: Nov. 26th, 2022; accepted: Dec. 16th, 2022; published: Dec. 28th, 2022

文章引用: 王浩宁, 黄明, 韩俊峰, 徐海栋, 李毅, 张雷, 张建林, 王浩粼, 谭力, 杜向阳. 改善低压农网电压质量的分布式光伏 - 储能系统优化配置方法[J]. 智能电网, 2022, 12(6): 187-197. DOI: 10.12677/sg.2022.126018

Abstract

The distribution line of low-voltage rural power grid is long and the branch structure is complex. The voltage of the low-voltage side of partial distribution transformer is often too low in the peak load period, and the voltage quality problem is prominent. To solve the above problems, this paper proposes a voltage quality improvement method based on photovoltaic and energy storage. This method takes the maximum economic revenue of the whole construction period as the goal, considers the constraints of energy storage operation, node voltage constraints and other relevant constraints, and uses ant colony algorithm to solve the optimal configuration of distributed photovoltaic (DPV)-energy storage system, establishes the optimization model of rural grid photovoltaic (PV)-energy storage low-voltage governance. Finally, the optimization model is verified by IEEE-33 nodes. The results show that the photovoltaic (PV)-energy storage system can increase the economic benefits of the whole distribution network system on the basis of improving the voltage quality at the end of rural power grid, and has more economic advantages compared with the non-PV energy storage system.

Keywords

Low Voltage Power Grid, Photovoltaic (pv), Energy Storage, Ant Colony Algorithm

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

经过多年建设,我国农村电网已覆盖绝大部分乡村。但随着我国城乡社会经济的发展,农村电气化水平不断提升,农电负荷不断增加,现有农村电网电能质量常常不能满足用户需求,其中的低电压问题亟待解决。

目前国内已针对配电网的低电压问题开展了较多研究。广泛采用的方法是采用无功补偿的方法降低负荷的无功消耗以此来抬升电压[1],但对于重负荷和馈线较长的情况,无功补偿调节能力有限,不能从根本上解决低电压问题;此外,还有在低压侧馈线末端加装调压器的方法,其本质是增加了一台小变比变压器。当负荷变化较大时,其调压范围也难以满足需求。

近年来,分布式光伏和储能已开始大规模应用。在配电变压器低压侧加装分布式光伏和储能将是调节配电网电能质量的一个好的方法。基于储能提升配电网电能质量的研究方面,文献[2]在考虑电能质量的同时,建立了配电网风-储双层配置模型,选择考虑风电机组运行状况的电能质量评估指标及计算方法,结果显示风-储的接入降低了总的运行成本,且提升了电网的电能质量。文献[3]引入了模糊综合评价法,在削峰填谷的同时,改善了配电网电压质量和经济收益,从而建立了双层优化模型。文献[4]针对低压配电网中的电压控制问题,提出了一种多电池储能系统的协调控制方法。结果表明,所提出的协调控制方案能够更均匀地使用储能,从而在电池更换次数和维护次数两方面降低了存储运营商的电池更换成本。

目前对光伏-储能系统的研究,技术层面主要是储能容量优化配置及控制策略。经济效益评估方面,文献[5]根据全年充放电优化策略,分析出不同电力定价下储能系统对经济性的影响。文献[6]比较了在多个分布式光伏项目中,不同的总发电量、不同的政策补贴对经济、环境效益等的影响。文献[7]以居民用

户和企业用户为研究对象,探讨用户不同用电模式、有无储能系统对使用光伏的用户产生的影响。文献[8]以制定光伏-储能系统策略为目标,建立了整个系统的成本收益模型、全生命周期模型。

尽管电压调节可以通过无功补偿来完成,然而对于低压农网来说,有功损耗是导致这一低电压的主要原因,采用无功补偿方式效果不佳,并且实际生产使用的分布式光伏通常只提供有功的输出[9][10]。

我国农村幅员辽阔,用电负荷具有小型、分散的特点。典型农村自然村落的住户分布如图1所示。可把所有住户分成A类和B类,A类住房比较集中,相互距离最远不超过1000m,且占村落住户的大多数。B类用户数量少且较为分散,离村子中心的距离在500m以上[11][12]。

对于这类农村村落,供电公司采用的供电方案是:采用10kV线路给全村供电,配电变压器安装在村落的负荷中心,即A类用户的中心,然后降压为220V,进而辐射给各用户供电。

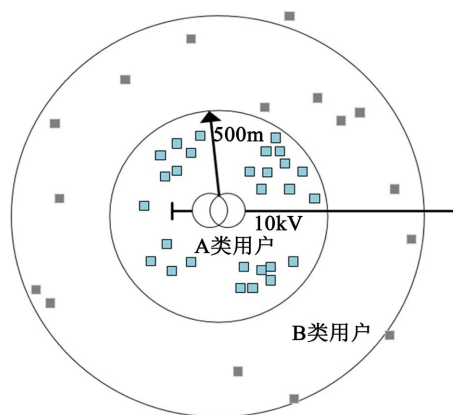


Figure 1. The household distribution diagram of a typical rural natural village

图1. 典型农村自然村落的住户分布示意图

由上可见,国内外对配电网采用光伏和储能具有不同的目标。城市电网中,利用风光、储能构建主动配电网,是新型电力系统的重要手段。但在农村电网中,以低电压治理为目标的应用,尚缺乏深入研究。农村电网的低电压治理其核心在于其技术经济指标如何设计以使得电能质量的投资成本能够快速收回,从而使其具有可行性[13]。

基于此,本文以光伏-储能系统建设整个周期的经济收益最大化为目标函数,通过蚁群算法优化在光伏接入配电网不同位置时的储能容量,在保持原有配电网结构和补偿设备不变的情况下,实现改善低压农网质量的目的。

2. 基于光伏-储能的低电压治理模型

2.1. 基于光伏-储能的低电压治理方案

针对农村电网线路末端低电压问题,本文在光伏-储能系统的基础上,提出一种农网低电压治理技术方案,核心思想是在台变低电压用户侧加装光伏-储能系统。光伏-储能系统由光伏、储能、逆变器、控制器及485通信总线组成,整个系统的原理图如图2所示[14]。

2.2. 面向低电压治理的光伏-储能配置目标函数

安装储能系统能最大程度实现光伏电力就地消纳,余电并网可增加农户经济收益,构建光伏-储能系统建设安装-运行维护-退役整个周期的经济收益模型[15]。目标函数为:

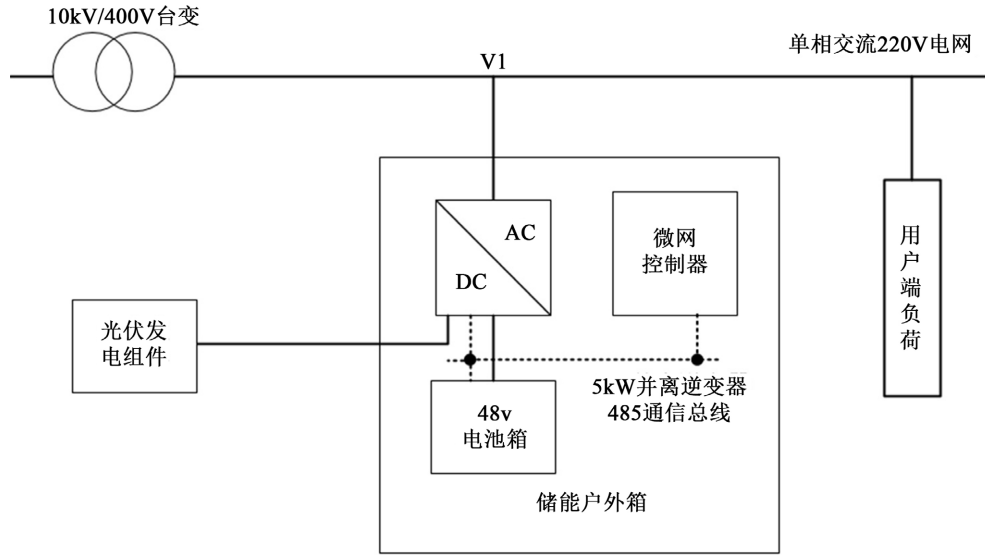


Figure 2. Schematic diagram of photovoltaic energy storage system
图 2. 光伏储能系统原理图

$$\max f = R_T - C_T \tag{1}$$

其中， R_T 为发电收益：

$$R_T = \sum_{n=1}^Y R_{en} + R_r \tag{2}$$

其中：

$$R_{en} = S_{an} + P_{un} \tag{3}$$

式中： R_{en} 为第 n 年发电带来的收益； Y 为系统运行周期； R_r 为设备回收过程带来的收益； S_{an} 为自用电量节省费用； P_{un} 为多余电量并网收益费用。

其中，系统投资总成本

$$C_T = C_I + C_{OM} + C_R \tag{4}$$

式中： C_I 为初始投资成本； C_{OM} 为维护更换成本； C_R 为退役成本，单位均为元。

$$C_I = C_{PV} + C_{BSS} \tag{5}$$

式中： C_{PV} 是光伏系统初始投资成本； C_{BSS} 是储能系统初始投资成本，单位均为元。

$$C_{PV} = P_a \sum_{i=1}^8 C_i \tag{6}$$

式中： P_a 是光伏峰值时的功率，W； $C_1 \sim C_8$ 表示辅件、组件、支架、系统逆变器、系统汇流箱、计量装置、安装和并网的单位成本，元/W。

$$C_{BSS} = C_{stor} \times E \tag{7}$$

式中： C_{stor} 是储能单位容量的成本，元/(kW·h)， E 是电池容量，kW·h。

$$C_{OM} = 20(O_{PV} + O_{BSS}) + E_{RC} \tag{8}$$

式中： O_{PV} 为光伏全年维护所需成本； O_{BSS} 为储能全年维护所需成本； E_{RC} 为整个系统更换一次所需成本。

$$C_R = \beta C_1 \quad (9)$$

式中： β 为退役成本系数。

2.3. 约束条件

整个模型的约束包括等式约束与不等式约束[16]。其中，等式约束包括功率平衡约束、潮流约束及储能能量约束；不等式约束主要包括电压约束等。

1) 潮流平衡约束

$$\Delta P_{bus} = P_{bus,m}^{ess} + P_G - P_{bus}^{load} - P_{bus}^{cal} = 0 \quad (10)$$

$$\Delta Q_{bus} = Q_{bus,m}^{ess} + Q_G - Q_{bus}^{load} - Q_{bus}^{cal} = 0 \quad (11)$$

式中： ΔP_{bus} 、 ΔQ_{bus} 为节点的有功、无功不平衡量； $P_{bus,m}^{ess}$ 、 $Q_{bus,m}^{ess}$ 为储能装置的有功、无功容量； P_G 、 Q_G 为光伏有功、无功出力； P_{bus}^{load} 、 Q_{bus}^{load} 为节点的有功、无功负荷； P_{bus}^{cal} 、 Q_{bus}^{cal} 为节点有功、无功注入功率。

2) 网络功率平衡约束

$$\sum P_{all} = \sum P_{load} + \sum P_{loss} \quad (12)$$

式中： $\sum P_{all}$ 为节点注入有功，kW； $\sum P_{load}$ 为总的有功，kW； $\sum P_{loss}$ 为整个系统的网络损耗，kW。

3) 储能系统运行平衡约束

$$\sum_s^T P_{bus,m}^{ess}(s) \Delta t = 0 \quad (13)$$

式中： $\sum_s^T P_{bus,m}^{ess}(s)$ 为相应阶段 s 的充放电功率，对于整个阶段，储能充、放电量保持平衡。

4) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (14)$$

$$\delta_{\min} \leq \delta_i \leq \delta_{\max} \quad (15)$$

式中： U_{\min} 、 U_{\max} 为节点电压 U_i 的下限与上限； δ_{\min} 、 δ_{\max} 为节点电压 δ_i 的相角下限与上限。

3. 基于改进蚁群算法的模型求解

蚁群算法是一种启发式优化算法，其被广泛应用得益于较强的求解能力。原理是蚂蚁在觅食过程中，会在路径上释放一种名叫信息素的物质，然后其它蚂蚁可根据之前蚂蚁释放的信息素在食物和巢穴之间移动，蚂蚁总是爬行在信息素较高的路径上，随着信息素不断地积累，越来越多的蚂蚁聚集在最短的线路上，迭代到一定程度时，最优觅食路径被找到[17]。

本文对传统蚁群算法中的期望因子 β 改进，即：

$$\beta = \begin{cases} a, & 0 < n \leq n_0 \\ b, & n_0 < n \leq n_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $a < b$ ， n_{\max} 为最大迭代次数，采用改进蚁群算法求解分布式储能系统的最优选址与定容的流程如下：

- 1) 设定网络结构参数、储能参数，确定目标函数，调节因子等参数。
- 2) 初始化信息素浓度。
- 3) 由信息素浓度，确定下一个路径转移的概率。
- 4) 更新信息素，重新计算每一条路径上的目标函数。

- 5) 最优解即为所有目标函数值中的最短路径。
- 6) 以上阶段反复迭代，直到达到设定的最大迭代代数，输出即为所求的最优配置方案。操作流程如图 3 所示。

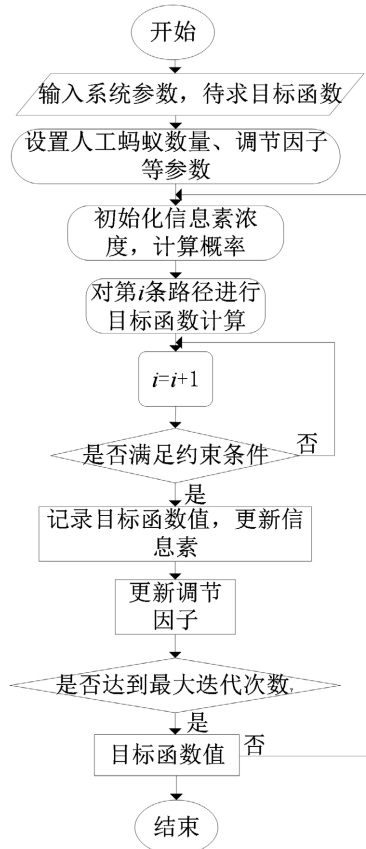


Figure 3. Operation flow chart
图 3. 操作流程

4. 算例

本文选用 IEEE-33 节点配电系统作为算例[18], 如图 4 所示。配电网系统的参数如表 1 所示。设定储能系统允许接入节点为 3-33, 接入节点数为 3 个, 储能电池选择低成本、长寿命、高安全、高能量密度的钠离子电池, 采用 10 kW~10 kWh 多晶硅 - 钠离子储能发电系统, 其系统参数如表 2 所示。其中, P_a 为光伏组件峰值功率, E_{pv} 为光伏单位容量成本, V 为储能电池容量, E_{BSS} 为储能单位容量成本, 元/kWh。以 20 年内整个配电网系统的经济收益最大为目标函数, 以行业规定下的低电压治理电压达到 $220\text{ V} \pm 7\%$ 为约束条件, 在农网配电系统的不同节点接入 DG, 分析研究不同节点接入 DG 后储能的选址定容情况以及对农村电网低电压问题的改善情况。

对当地实际历史光伏数据进行统计分析, 选取可用的样本数据, 选取原则是波动频率高、波动范围大, 最终选取的光伏日出力曲线如图 5 所示[19]。

为简化计算, 限制接入的 DG 个数为 1, 容量为总负荷的 40%, 功率因数为 0.9 滞后, 储能的最大放电功率为 6 kW, 储能接入的个数限制为 3 个, 可连续充放电 4 h, DG 的接入位置如表 3 所示, 选取了具有代表性的配电线路的前端、中部、中后部和末端[20], 仿真结果见图 6、图 7 和表 4 所示。

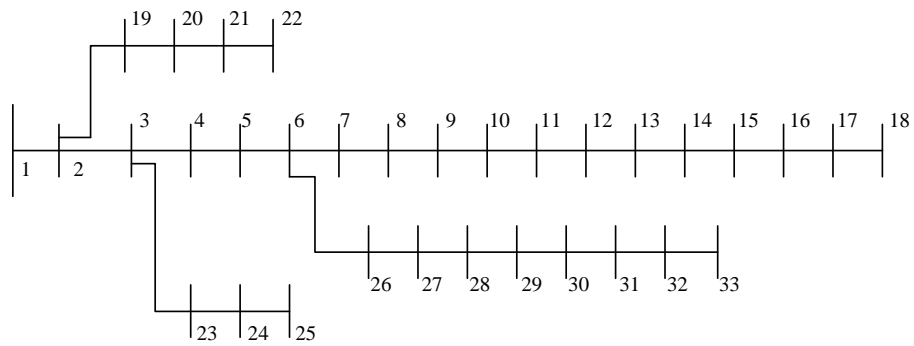


Figure 4. Power distribution system of IEEE33 nodes

图 4. IEEE33 节点配电系统

Table 1. Branch parameters of the distribution network of IEEE33 nodes

表 1. IEEE33 节点配电网支路参数

节点 i	节点 j	节点 j 负荷/kW	支路 ij 阻抗/ Ω
1	2	9+j4	0.4930+j0.2511
2	3	12+j8	0.3660+j0.1864
3	4	6+j3	0.3811+j0.1941
4	5	6+j2	0.8190+j0.7070
5	6	20+j10	0.1872+j0.6188
6	7	20+j10	0.7114+j0.2351
7	8	6+j2	1.0300+j0.7400
8	9	6+j2	1.0440+j0.7400
9	10	4.5+j3	0.1966+j0.0650
10	11	6+j3.5	0.3744+j0.1238
11	12	6+j3.5	1.4680+j1.1550
12	13	12+j8	0.5416+j0.7129
13	14	6+j1	0.5910+j0.5260
14	15	6+j2	0.7463+j0.5450
15	16	6+j2	1.2890+j1.7210
16	17	9+j4	0.3720+j0.5740
1	18	9+j4	0.1640+j0.1565
18	19	9+j4	1.5042+j1.3554
19	20	9+j4	0.4095+j0.4784
20	21	9+j4	0.7089+j0.9373
2	22	9+j5	0.4512+j0.3083
22	23	42+j20	0.8980+j0.7091
23	24	42+j20	0.8960+j0.7011
5	25	6+j2.5	0.2030+j0.1034

Continued

25	26	6+j2.5	0.2842+j0.1447
26	27	6+j2	1.0590+j0.9337
27	28	12+j7	0.8042+j0.7006
28	29	20+j60	0.5075+j0.2585
29	30	15+j7	0.9744+j0.9630
30	31	21+j7	0.3105+j0.3619
31	32	6+j4	0.3410+j0.5362
32	33	10+j6	0.0922+j0.047

Table 2. Parameters of PV-energy storage system

表 2. 光伏 - 储能系统参数

	要素	数值
光伏	单块组件容量	365 W
	总装机容量	10 kW
	单位成本	3.5 元/W
	年均维护成本	1% $P_a E_{pv}$
	充放电深度(x)	90%~100%
储能	放电效率(D)	90%
	单位成本	400 元/kWh
	年均维护成本	1.5% VE_{BSS}

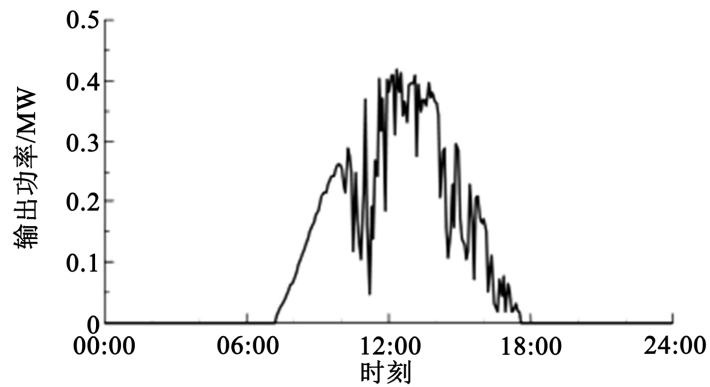


Figure 5. PV sunrise force curve

图 5. 光伏日出力曲线

Table 3. Change of access position of DG

表 3. DG 接入位置的变化

case	1	2	3	4	5
DG 接入节点	无	3	8	13	18
接入位置	无	前端	中部	中后部	末端

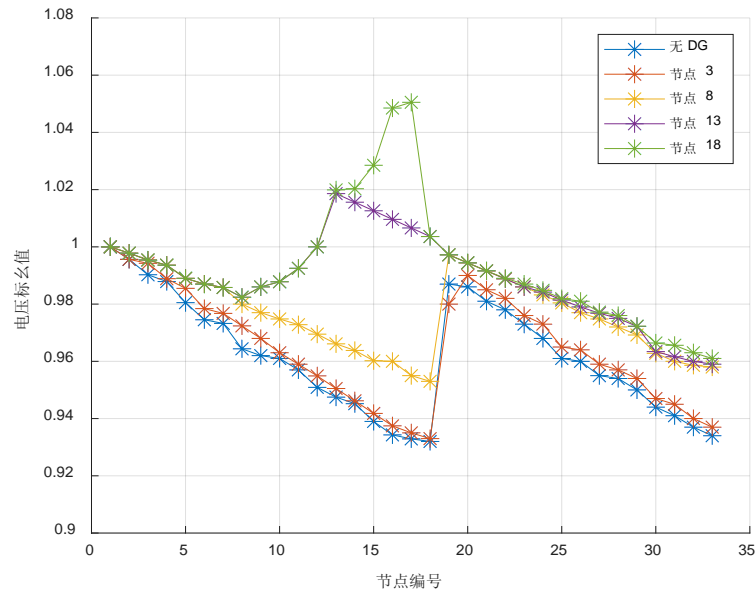


Figure 6. Voltage distribution
图 6. 电压分布情况

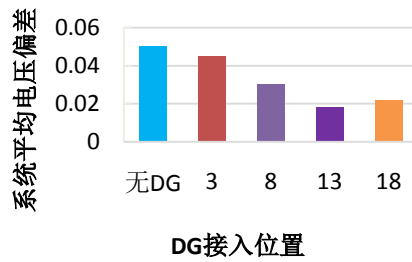


Figure 7. Average voltage deviation
图 7. 平均电压偏差情况

Table 4. Energy storage configuration results
表 4. 储能配置结果

	节点(容量)	节点(容量)	节点(容量)
Case1	2 (20)	8 (37)	12 (10)
Case2	3 (14)	11 (30)	16 (7)
Case3	4 (12)	7 (26)	17 (5)
Case4	5 (8)	12 (20)	16 (4)
Case5	5 (7)	12 (18)	16 (3)

注: ()内为该接入该节点的储能容量(单位: kW)。

由仿真结果可知, DG 的功率因数与出力一定时, DG 的接入位置对电压的改善情况以及储能的选址定容影响较大。DG 接入位置靠近母线时, 对电压的改善情况越差, 储能所需的容量也越大; 相应的, 当 DG 接入的位置越靠近末端时, 对电压的改善越好, 能够有效的防止低电压的产生, 所需配置的储能容量也越小。

由图 7 进一步研究发现, 当 DG 的接入太靠近末端时, 相应的平均电压偏差越大。故而, 将 DG 配置在配电线路的中后部, 有利于改善末端的低电压问题以及减小平均电压偏差。

在系统整个生命周期内, 光伏系统的逆变器更换 2 次, 汇流箱更换 1 次, 计量装置更换 1 次, 储能电池更换 2 次[21]。光伏组件回收价格为初始价格的 40%。规划周期为 20 年的总收益对比如表 5 所示。

Table 5. Economic comparison (Unit: Yuan)

表 5. 经济性对比(单位: 元)

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
总收益	17,038	29,810	32,481	38,624	41,253

由表 5 结论可知, 相比于无光伏的储能系统, 光伏 - 储能系统通过光伏出力与负荷的匹配, 使负荷消纳光伏, 从而提升末端电压, 降低整个系统的网损, 故而光伏 - 储能系统的经济效益更高; 而在 DG 的出力与功率因数不变的情况下, 越靠近配电网末端安装 DG, 越能使得光伏与储能配合利用峰谷电价政策低储高发进行套利, 故而 DG 的接入位置越靠近主馈线末端, 整个系统的收益越大。

5. 结论

本文针对农村电网结构薄弱、供电半径过长导致的末端台区低电压问题, 采用光伏 - 储能系统来改善配电网的结构, 结论如下:

1) 以配电网系统整个生命周期的经济效益最大化为目标, 建立了分布式光伏 - 储能系统经济效益分析模型, 该模型能够有效地改善配电网的电压质量。

2) 相比无光伏储能系统, 采用光伏 - 储能系统能够最大程度实现光伏电力就地消纳, 余电并网, 从而增加整体的经济收益。

3) 越靠近配电网中后部接入光伏, 整个系统电压偏差越小; 越靠近配电网末端接入光伏, 相应的储能配置容量越小, 整个规划周期内的总收益越高。

参考文献

- [1] 黄嘉楠, 向小民, 邢彧. 基于低电压治理的配电网优化策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 200-206.
- [2] 李彦晨, 贾燕冰, 谢栋, 等. 计及电能质量影响的配电网风储优化配置[J/OL]. 电网技术, 1-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20220414.1602.004.html>, 2022-12-12.
- [3] 王一飞, 董新伟, 杨飞, 等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 126-133.
- [4] Wang, L., Liang, D.H., Crossland, A.F., et al. (2015) Coordination of Multiple Energy Storage Units in a Low-Voltage Distribution Network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6, 2906-2918. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2452579>
- [5] 贾禾, 彭晋卿, 李念平, 等. 动态电价下分布式光伏-储能系统优化与经济性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 187-193.
- [6] 陈梓毅, 曹焯, 邱国玉. 城市分布式光伏发电的经济和环境效益实证分析[J]. 生态经济, 2018, 34(6): 100-105.
- [7] 孙波, 廖强强, 刘宇, 等. 分布式光伏储能电池混合系统的经济性分析[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 102-107.
- [8] 王小虎, 楚春礼, 曹植, 等. 分布式光伏-储能系统经济-碳排放-能源效益实证分析——以山东省胶州光伏及其储能系统为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 402-414.
- [9] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [10] 赵立军, 张秀路, 韩丽维, 等. 基于多场景的配电网分布式光伏及储能规划[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 460-468.
- [11] 张战彬, 段璐, 石磊磊, 等. 改善低压农网电压质量的分布式光伏电源优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2016, 44(22): 129-135.
- [12] 马兴, 徐瑞林, 康文发, 等. 含分布式光伏、储能的低压配电网电压调节及储能 SoC 均衡方法[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(5): 9-20.
- [13] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2187-2201+2.
- [14] 何森, 林舜江, 李广凯. 含光伏的低压配电网分布式储能多目标优化配置与运行[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(3): 18-27.
- [15] 张天卫, 袁旭峰, 时豪, 等. 含扶贫式光伏农村配电网电能质量综合控制技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 54-58+66.
- [16] 滕云, 左浩, 李新, 等. 基于光伏储能分离配置的配电网电压薄弱性抑制方法[J]. 可再生能源, 2018, 36(8): 1158-1162.
- [17] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等. 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(1): 23-30.
- [18] 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.
- [19] 舒大松, 黄挚雄, 康伦, 等. 基于超级电容储能的光伏并网低电压穿越研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(8): 60-64.
- [20] 张洋, 李强, 李朝晖, 等. 光伏-储能联合微网系统工程方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 212-214.
- [21] 张雨曼, 刘学智, 严正, 等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2372-2386.