

电池储能系统参与配电网电压调节的策略研究

焦永斌, 秦会斌, 华咏竹, 周继军

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 以可再生能源为核心的分布式发电(Distributed Generation, DG)易受天气、季节、气候等条件的影响, 具有间歇性、随机性发电的特点。当大规模接入配电网后会电能的质量, 降低电网的稳定性, 从而会使电网电压产生波动。针对传统的电压调节方法存在的不足, 提出了一种利用电池储能系统(Battery Energy Storage Systems, BESSs)来进行电网电压调节的策略, 对电网电压进行调节的同时, 对电池的电荷状态(State of Charge, SOC)也进行实时监控, 避免电池在充放电时发生过充过放。

关键词: 配电网; 分布式发电; 电池储能系统; 电压调节; SOC

中图分类号: TM721

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200322

中文引用格式: 焦永斌, 秦会斌, 华咏竹, 等. 电池储能系统参与配电网电压调节的策略研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 123-126, 131.

英文引用格式: Jiao Yongbin, Qin Huibin, Hua Yongzhu, et al. Battery energy storage systems participates in the strategy research of voltage regulation of distribution network[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 123-126, 131.

Battery energy storage systems participates in the strategy research of voltage regulation of distribution network

Jiao Yongbin, Qin Huibin, Hua Yongzhu, Zhou Jijun

(Institute of New Electron Device & Application, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Distributed generation(DG) with clean and renewable energy as its core is susceptible to weather, season, and climate conditions. It has the characteristics of intermittent and random power generation. Large-scale access to the distribution network will affect the quality of power and reduce the stability of the power grid, which will cause fluctuations in the grid voltage. In view of the shortcomings of the traditional voltage regulation methods, a strategy for grid voltage regulation by using battery energy storage systems(BESSs) is proposed to adjust the grid voltage while the state of charge(SOC) of the battery also performs real-time monitoring to prevent overcharging and overcharging of the battery during charging and discharging.

Key words: distribution network; distributed generation; battery energy storage systems; voltage regulation; SOC

0 引言

随着社会的不断进步和发展, 能源的需求和消耗日益增加。因此能源危机和环境污染问题越来越严重。传统的化石能源如煤炭、石油、天然气, 是不可再生能源, 随着消耗越来越紧缺, 并且还会带来环境污染和全球变暖等一系列问题。党的十八大以来, 我国在生态文明建设方面已经取得很大的进步, 但目前我国的环境问题、能源改革问题依然艰巨, 亟待以绿色发展引领能源行业变革。十九大报告指出, 要坚持绿色发展理念, 推进能源生产和消费革命, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系。发展清洁能源是改善能源结构、保障能源安全、推进生态文明建设的重要任务。因此改变能源结构, 发展可再生能源成为目前的研究重点。近年来, 太阳能、风能、潮汐能等可再生能源快速发展, 可再生能源的应用改善了

传统的能源体系, 其具有污染少、可持续的优势。因此, 以可再生能源为核心的分布式发电得到大规模运用和发展。但是由于可再生能源容易受到天气、季节、气候等因素的影响, 以可再生能源为核心的分布式发电具有间歇性、随机性和不稳定性, 当大规模分布式发电接入配电网后, 电网电压容易发生波动, 从而影响电气设备的寿命, 增加配电网的功率损耗。综上所述, 研究分布式发电的特点, 找到一种合适的配电网电压调节策略是十分必要的。

近年来, 大量分布式电源接入配电网, 为配电网带来了影响, 主要表现在电压波动、潮流流向、系统保护等方面, 但与之相关的技术解决方案也正在开展研究。文献[1]、[2]提出将串联电容补偿应用到配电网的电压调节中, 当电压发生波动时, 可检测负荷侧电压, 计算

电路与系统 Circuits and Systems

出需要的电容补偿量,自动调节等效阻抗,从而稳定电网电压。文献[3]提出利用调节有载调压变压器(On-Load Tap Changer, OLTC)的分接头来改善配电网电压分布,在 OLTC 无法满足的情况下,利用 OLTC 和静止无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)复合式调节方式,来稳定配电网电压。文献[4]提出一种晶闸管分级电压调节器(Thyristor Voltage Regulator, TVR),可以自动分级调节电网电压,并可以适应潮流方向的变化。但是电容补偿、OLTC、电压调节器这几种方法调节速率低,并且频繁调节还会降低使用寿命,降低调节效率。

为了解决这些传统调节方法的不足,近年来的研究表明将电池储能系统(BESSs)运用到配电网电压调节中有很好的应用前景。文献[5]从储能系统对配电网电压的改善作用方面考虑,提出了集群电压自治策略。在文献[6]中,通过获取电池单元的最佳位置、容量和额定功率,开发了一种包括风电 DG 的有源配电网。电池同时针对多个对象进行调度,即调峰、调压和提高可靠性。文献[7]研究了在主动配电网背景下的储能系统优化配置问题,建立了相应的优化配置模型,并提出了求解方法,发挥储能系统对主动配电网的最大支撑作用。文献[8]引入储能装置并利用充放电的特性对配电网电压偏差指标进行优化,提出的配电网有功-无功协调优化模型可有效地降低配电网电压偏差。文献[9]提出“削峰填谷”和“平滑负荷”两种优化目标,针对这两种优化目标,研究储能系统配置的问题。文献[10]介绍了一种电网规模的 BESSs 的运行和控制方法,该系统旨在减轻光伏(PhotoVoltaic, PV)集成的负面影响,同时提高整体配电系统的效率和运行。文献[11]对带有储能系统的风力发电接入配电网产生的问题进行了深入研究。文献[12]建立了电池储能系统接入配电网后的数学模型,研究了储能容量配置和优化问题。

本文基于前人研究所做的工作,提出了一种新的 BESSs 协调控制算法,通过多个 BESSs 的协调充放电,将电网节点电压控制在允许范围内,降低了配电网电压偏差带来的不利影响。BESSs 参与配电网电压调节这种方法响应速度快,降低了配电网的电压波动,提高了电能质量。并且还可以实时监控电荷状态(SOC)来获取电池的剩余容量大小,以此来调整充电还是放电,减少了电池组的充放电次数,提高了电池组的使用寿命。

1 BESSs 参与配电网调压的模型

本文提出的电池储能系统参与配电网电压调节的结构框架如图 1 所示。在该结构中,控制中心可以通过通信网络获取电池组的状态。为了实现 BESSs 的协调控制,需要了解电池组电荷状态,包括电荷状态的上限(SOC_{max})、电荷状态的下限(SOC_{min})、储能设备的容量、位置信息、连接状态等。控制中心通过获取这些状态信息,将充电或者放电指令发送给 BESSs, BESSs 从控制中心

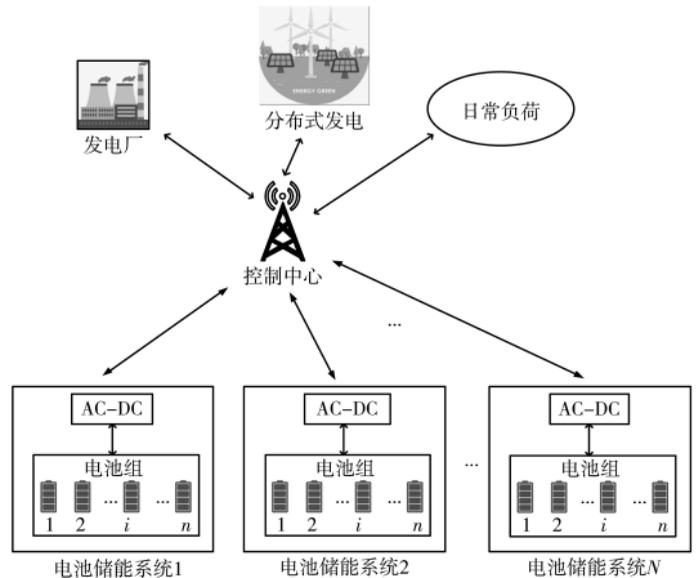


图 1 电池储能系统参与配电网调压的结构框架

接收到指令完成相应操作。在充电和放电过程中,调节功率由每个节点所有的 BESSs 来完成。调节之后,每个 BESS 的 SOC 不会过高或者过低。以此调整配电网的节点电压偏差,提高电能质量。

2 协调控制算法

为了实现 BESSs 参与配电网节点电压调节,提出了一种协调控制算法,该协调控制算法包括:潮流计算, SOC 实时检测, BESSs 充放电控制。该方法可以有效抑制电压波动,响应速度快,稳定性好,提高配电网供电质量。

BESSs 参与配电网电压调节需要根据配电网节点电压状态进行判断。从 IEEE 1159-2009 标准^[12]可以得知,当配电网节点电压范围在 0.8~0.9 p.u. 之间,且持续时间大于 1 min 被认为是欠电压;当电压的范围在 1.1~1.2 p.u. 之间,且持续时间大于 1 min 被认为是过电压。若是过电压或者欠电压就通过 BESSs 进行调节。0.9~1.1 p.u. 则是无需调节。当配电网的节点电压需要调节时,根据 BESSs 实时检测到的该节点的电池组的 SOC 状态信息,让该节点的电池组进行充放电,来达到调压的目的。

2.1 潮流计算

电力系统潮流计算是电力系统分析中最基本的也是最重要的计算,是电力系统运行、规划以及安全性、可靠性分析和优化的基础。牛顿-拉夫逊法用来提供涉及数值分析的解决方案,可根据其需要更少迭代次数达到收敛。牛顿-拉夫逊法的含分布式电源的配网潮流计算具有较快的收敛速度,且针对各种复杂的分布式电源类型和并网控制策略,其潮流计算结果能做到较好的收敛。

牛顿-拉夫逊算法中有功和无功功率表达式为:

《电子技术应用》2020年 第46卷 第9期

电路与系统 Circuits and Systems

$$P_i = |U_i| \sum_{j=1}^n |U_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_j - \delta_i + \delta_j) \quad (1)$$

$$Q_i = -|U_i| \sum_{j=1}^n |U_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_j - \delta_i + \delta_j) \quad (2)$$

式中： i, j 表示节点； $P, Q, U, \theta, Y, \delta$ 分别表示有功功率、无功功率、母线上的电压幅值、电压相角、线路导纳和阻抗相角。

牛顿-拉夫逊法潮流计算的修正方程如下：每次迭代更新雅可比矩阵，直到满足收敛为止，然后对所得到的雅可比矩阵 J 进行求逆以计算 S 矩阵。

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 S 矩阵等于 J^{-1}

$$S = J^{-1} = \begin{bmatrix} S_{\theta P} & S_{\theta Q} \\ S_{UP} & S_{UQ} \end{bmatrix} \quad (4)$$

电压幅值的变化 ΔU 可通过式(5)计算。

$$\Delta U = S_{UP} \cdot \Delta P_V + S_{UQ} \cdot \Delta Q \quad (5)$$

本文只考虑 BESSs 的有功功率调节，则式(4)应为：

$$\Delta P_V = S_{UP}^{-1} \cdot \Delta U \quad (6)$$

其中 ΔP_V 是配电网电压调节的补偿功率。

每个节点参与调节的电池组的数量应为：

$$N = \Delta P_{Vi} / P_b \quad (7)$$

其中， ΔP_{Vi} 是 i 节点中所有电池组总的调节功率， P_b 是单个电池组的调节功率， N 是可以参与调节的电池组的数量。

2.2 SOC 实时检测

电池储能系统参与电网调压时，要先确定电池组的状态，图 2 是电池组单元的状态示意图。BESSs 参与调压时其节点电池组的 SOC 与充电功率和充电时间有关，因此 SOC 可以用如下公式表示：

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{P_b}{Cap_b} \Delta t \quad (8)$$

其中 $SOC(t+1)$ 是 t 时刻上一时刻的 SOC， $SOC(t)$ 是 t 时

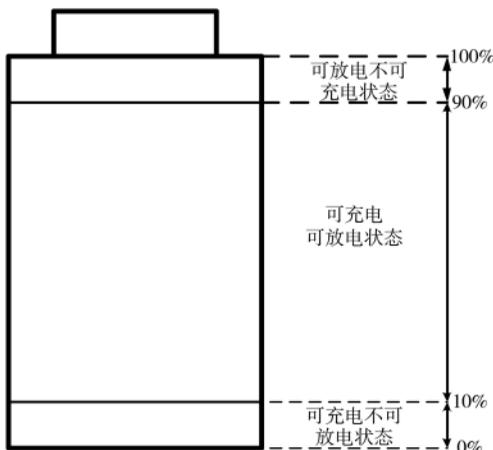


图 2 电池组单元的三种状态示意图

刻的 SOC， Cap_b 是电池的总容量， P_b 是电池充电或者放电时的功率， Δt 是持续充电或放电的时间。

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (9)$$

其中， SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别是 SOC 的最小值和最大值。

当电池组 i 的 $SOC < 10\%$ 时，电池处于可充电不可放电状态，电池组 i 只能充电，不能放电。充电时，电池组 i 的 SOC 不能超过电池容量的 90%，当充电时 SOC 超过 90%，电池就切换到可放电不可充电状态。

当电池组 i 的 $SOC > 90\%$ 时，电池处于可放电不可充电状态，电池组 i 只能放电，不能充电。放电时，电池组 i 的 SOC 不能低于 10%，当放电时 SOC 低于 10%，电池就切换到可充电不可放电状态。

当电池组 i 的 SOC 位于 10%~90% 之间时，电池处于可充电可放电状态，电池组 i 可以充电，但是充电时，电池组 i 的 SOC 不能超过 90%，当充电时 SOC 超过 90%，电池就切换到可放电不可充电状态；电池组 i 也可以用来放电，但是放电时，电池组 i 的 SOC 不能低于 10%，放电时 SOC 低于 10%，电池就切换到可充电不可放电状态。

2.3 BESSs 充放电控制

图 3 是 BESSs 参与电网调压的流程图。从这个流程图可以看出：首先，要对节点电压进行判断是否需要调节。需要调节时可以从电池储能系统中得到该节点的调节功率 (ΔP_{Vi})。然后，为了避免电池组在充放电时造成损坏，要对电池组的 SOC 进行检测。当节点电压范围在

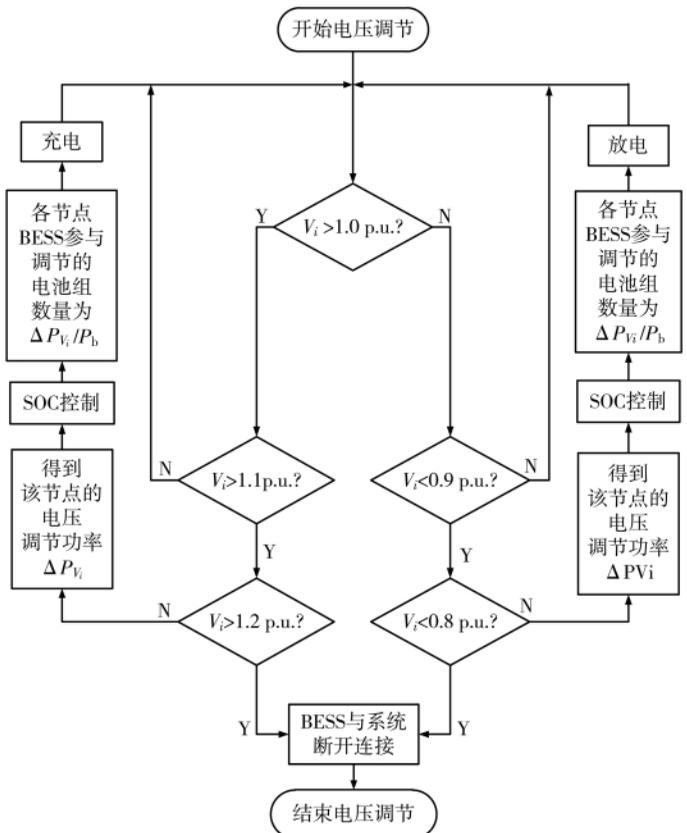


图 3 BESSs 参与电网调压的流程图

电路与系统

Circuits and Systems

0.8~0.9 p.u.之间时,该节点欠压,通过检测该节点所有电池组的SOC,根据电池组的剩余电量进行排序,选择该节点的 N 个电池组中SOC大于10%的电池组(根据SOC从大到小进行选择)进行放电。同理,当节点电压范围在1.1~1.2 p.u.时,该节点过压,通过检测该节点所有电池组的SOC,根据电池组的剩余电量进行排序,选择该节点的 N 个电池组中SOC小于90%的电池组(根据SOC从小到大进行选择)进行充电。当电压范围在0.9~1.1 p.u.时,无需调节。而当电压低于0.8 p.u.或者大于1.2 p.u.时,电池组不足以进行调节,BESSs将和系统断开连接,不参与调节。

3 试验结果和分析

图4是IEEE 33节点配电系统。采用IEEE 33节点配电系统对本文提出的协调控制算法进行验证。节点1为参考节点,参考电压固定在1 p.u.。其余32个节点是用户节点,每个节点的电压允许范围为[0.9, 1.1] p.u.。仿真是在一天的24小时之间进行的,将24小时平均分为2880个时段,即每个时段为30 s。本文以铅酸电池组作为BESSs,为了使BESSs具有充放电余量并且可以防止过充过放,节点电压应控制在 $0.9 \text{ p.u.} \leq V_i \leq 1.1 \text{ p.u.}$ 。

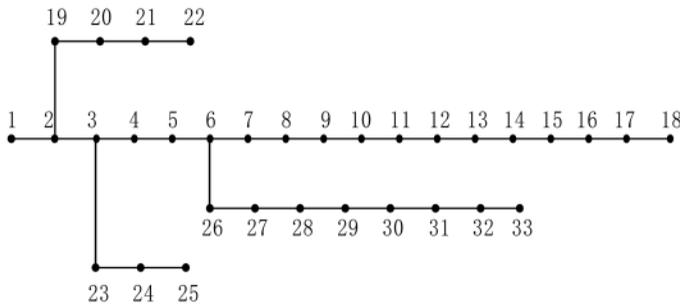


图4 IEEE 33节点配电系统

假设每一个节点有100个用户,每个用户都配备了一个光伏系统,日负荷数据和光伏发电数据如图5所示。配电网的负荷基本维持在2.397~5.006 MW之间,光

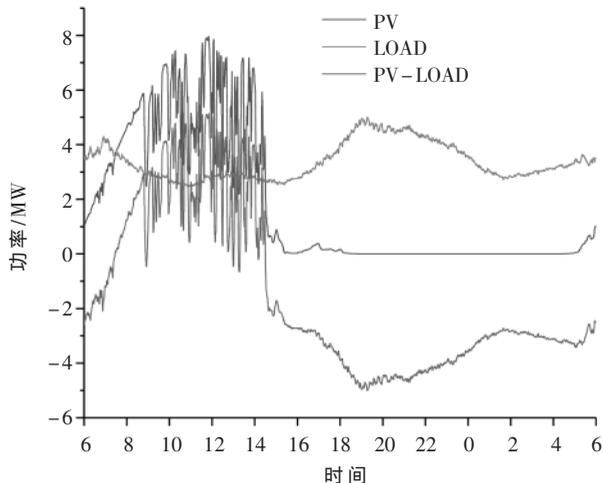


图5 日负荷和光伏功率曲线

伏发电的主要时间在6点到18点之间,其余时间发电量基本为零。PV发电在9点到14点之间达到最大值,但是因为天气原因,发电量不会恒定,所以一直发生间歇性变化。当发电量无法满足负荷时,电网电压就会发生波动。

电网电压调节前后的波动曲线分别如图6和图7所示,其中,每条曲线表示每个节点在24小时内的电压变化。从图6中可以看出,电网电压调节前,在9点到11点之间和11点到13点之间,由于光伏发电量大于负荷的消耗,因此电压高出正常范围,存在配电网节点电压大于1.1 p.u.的现象,电网会出现过电压状态。在18点到22点之间,由于光伏发电量不能满足负荷的消耗量,因此电压低于正常范围,出现配电网电压低于0.9 p.u.的现象,电网会出现欠电压状态。图6中测得数据得出:电压的最大值和最小值分别为1.12 p.u.和0.88 p.u.。

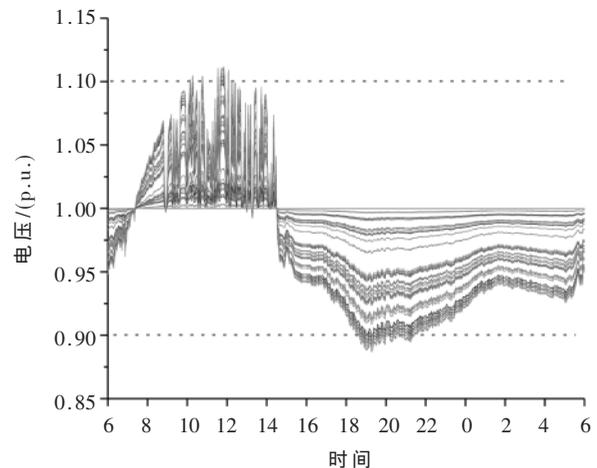


图6 电网电压调节前的波动曲线

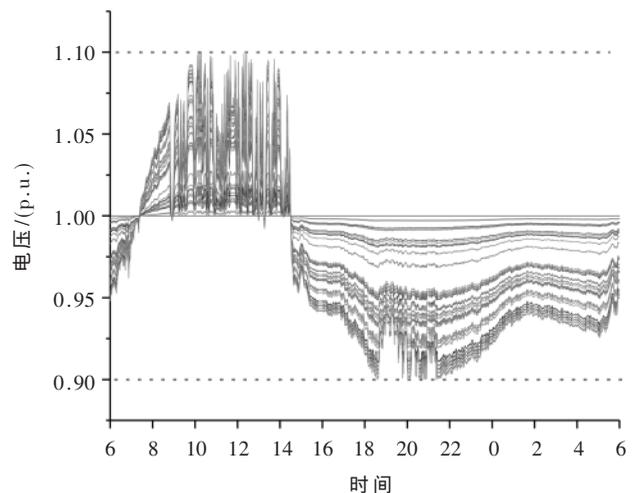


图7 电网电压调节后的波动曲线

图7是电网电压调节后的结果。该协调控制算法通过控制BESSs的充电和放电来调节电网电压波动。当电

(下转第131页)

电路与系统 Circuits and Systems

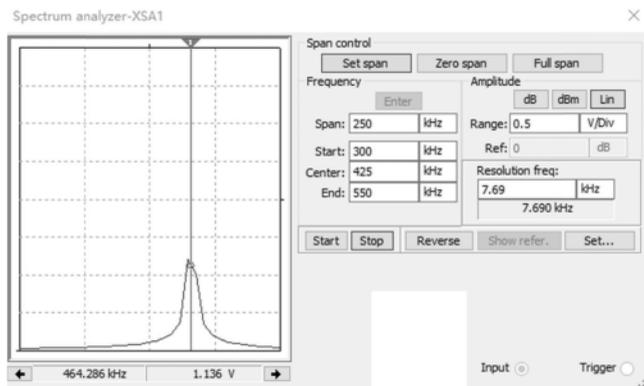


图9 BPF输出频域仿真结果

上进行了开关混频原理的推导,通过对方波信号进行傅里叶级数展开,得到I型、II型开关混频模型,以NPN型晶体管为例设计出混频电路,并用Multisim软件平台仿真验证。以AM信号为例进行了下混频,并引入加

(上接第126页)

压超过正常范围时,电池储能系统就对配电网进行调节,在9点到11点和11点到13点之间存在有配电网节点电压大于1.1 p.u.,此时需要电池储能系统对电池组进行充电以调整节点电压。在18点到22点之间存在配电网电压低于0.9 p.u.的情况,需要电池储能系统对配电网进行放电,以调整配电网电压偏低。从图7中可以看出,调节之后的电压均在0.9 p.u.到1.1 p.u.之间分布。

4 结论

本文提出了一种电池储能系统参与配电网调压的协调控制算法,SOC的实时检测可以获取电池组的状态信息,通过BESSs对节点的电池组进行充放电来调节配电网节点电压波动。通过MATLAB仿真可以看出,所提出的算法可以有效地进行电网调压。结果表明,本文提出的算法改善了电压波动,提高了电能质量,减少了电池的充放电次数,提高了电池的使用寿命,并且调节速率快,还可以实时监控电池的剩余电量状态。

参考文献

- [1] 顾正祥.配电网电压调节中电容补偿机制应用价值分析[J].电子制作,2019(12):67-68.
- [2] 张先泰,蔡金锭,丁智华,等.电容补偿在配电网电压调节中的应用[J].电力自动化设备,2011,31(2):116-118,128.
- [3] 费丽强,赵娜.基于OLTC和SVC的光伏并网发电电压控制技术[J].电网与清洁能源,2012,28(5):50-53.
- [4] 刘连光,姚海燕,伦涛.晶闸管分级电压调节器和配电网调压技术[J].电工技术,2004(4):5-7.
- [5] 李国武,李艳琼,刘娇扬,等.考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30

速电容,通过选频得到中频信号,仿真结果表明该方法显著提高了混频性能。

参考文献

- [1] 高吉祥,高广珠.高频电子线路[M].北京:电子工业出版社,2016.
- [2] 刘卿,顾旭东,倪彬彬.甚低频接收机的开发与应用[J].现代电子技术,2018,41(14):1-4,9.
- [3] 金伟正,夏可为,高懿凝,等.AM/FM甚高频接收机实验案例的设计与实现[J].电气电子教学学报,2018,40(6):119-122,151.
- [4] 唐波,黄文玲,张静远.基于模拟开关的混频器设计[J].微型机与应用,2017,36(10):94-95,98.
- [5] 王庆华,黄炳华.混频振荡与功率平衡的研究[J].现代电子技术,2018,41(21):173-178.
- [6] 胡沁春,刘刚利,肖菊兰,等.信号与系统[M].重庆:重庆大学出版社,2018.

(下转第136页)

(12):1-10.

- [6] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [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] 刘洪,徐正阳,葛少云,等.考虑储能调节的主动配电网有功-无功协调运行与电压控制[J].电力系统自动化,2019,43(11):51-62.
- [9] 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.
- [10] HILL C A, SUCH M C, CHEN D, et al. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 850-857.
- [11] 李星朗.基于储能系统的有源配电网供电末端电能质量调控技术研究[D].沈阳:沈阳工程学院,2017.
- [12] IEEE Std 1159-1995. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S]. 2009.
- [13] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等.分布式发电及其并网技术综述[J].电网技术,2008(15):71-76.

(收稿日期:2020-04-21)

作者简介:

焦永斌(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:电路与系统。

秦会斌(196-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:电子信息材料与电子信息器件的分析、设计与研制工作,E-mail:qinhuibin@hdu.edu.cn。

华咏竹(1991-),男,博士研究生,主要研究方向:嵌入式技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所