

考虑电动汽车的并网型微网储能选址定容

张明锐¹, 谢青青¹, 欧阳丽²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070)

摘要: 基于电动汽车(EV)入网和电池储能系统(BESS)模块化封装设计特点, 研究并网型微网的EV能量管理、BESS优化配置和运行。制定2种电价引导机制, 建立EV有序充电和有序充放电管理模式; 离散化节点上BESS安装容量, 考虑BESS荷电量时段间耦合约束, 以一日内BESS投资成本和微网运行成本之和最小为目标, 构建BESS选址定容模型。分别运用直流最优潮流(DCOPF)法和交流最优潮流(ACOPF)法, 并采用KNITRO求解器计算该混合整数非线性规划(MINLP)问题。仿真结果表明: ACOPF方法可精确配置BESS模块数量和位置; 相比EV有序充电, 有序充放电模式可显著减少BESS配置容量; 激励EV参与孤岛, 可提高备用容量充裕度, 增强微网运行可靠性。

关键词: 电池储能系统; 选址定容; 电动汽车; 储能; 能量管理; 混合整数非线性规划; 微网

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.004

0 引言

并网型微网在可再生能源利用、电动汽车管理、电能质量改善、供电可靠性提高等方面体现出更大价值, 其研究越来越受到重视^[1]。但随着微网中分布式电源渗透率的提高, 其间歇性和不可控性给微网的规划运行带来了巨大挑战。电池储能系统BESS(Battery Energy Storage System)作为并网型微网的重要组成部分, 具有响应速度快、操控性强等特点, 是弥补分布式发电间歇性功率的有效手段^[2]。但是BESS价格昂贵, 为减少储能的投资成本, 考虑到近年来快速发展的电动汽车EV(Electric Vehicle)接入微网^[3-4], 利用EV的电池储能, 可以有效减少BESS配置容量, 确保微网运行的经济性和稳定性^[5-6]。BESS接入位置的确定, 需要考虑其对负荷平衡、电能质量、网络阻塞等因素的影响, 而EV的移动性又增加了BESS选址的复杂性和难度。

关于BESS容量的配置, 文献[7]提出了一种经济性优化方法, 采用矩阵实数编码遗传算法分别求解了晴、雨、阴天铅酸蓄电池和钒液流电池的容量配置。文献[8]通过计算不同储能容量下各微源出力和联络线功率, 最小化孤岛运营成本或最大化联网收益来选择储能容量。

为精确配置BESS, 需要进一步考虑储能接入位置。文献[9]在负荷最大运行方式下, 最小化系统期望运行成本和电压波动方差, 运用混合多目标粒子

群算法求解储能的功率和位置。文献[10]从削峰填谷能力、电压质量以及功率主动调节3个方面, 建立主动配电网储能系统的多目标配置模型。以上2篇文献均从单一时段进行配置, 未考虑BESS荷电量的时段间耦合约束, 在实际运行时, 所配置BESS的荷电量在其他时段可能不足以供给系统缺额功率。文献[11-13]考虑了多时段连续的典型日场景, 以满足电网运行要求为前提, 建立了配电网及智能电网储能选址定容优化模型, 并采用现代智能算法求解, 但智能算法本质上的随机性和低效性限制了其实用化。文献[14]则将主动配电网储能选址定容MINLP问题松弛成混合整数二阶锥规划^[15], 采用YALMIP优化工具箱和GUROBI求解器求解, 降低了求解难度。

目前的储能系统生产厂家, 特别是BESS一般都是采用模块化的设计和封装, 因此每个储能单元的容量值必须是离散的^[10]。上述文献除文献[10]外, 均没有考虑BESS模块化封装设计的特性, 本文基于此特性及能量型储能输出功率有限的特点, 将节点安装的BESS容量离散化处理, 并考虑各节点BESS额定输出功率与模块安装数量成正比, 结合EV调度管理, 对并网型微网的BESS选址定容和优化运行进行研究。首先, 制定电价引导机制对EV进行充放电能量管理。在考虑微网与大电网交互功率的基础上, 满足微网安全运行限制, 以一日内储能投资成本和微网运行成本之和最小为目标, 建立BESS选址定容模型。最后, 以14节点微网验证本文方法的可行性和有效性, 并分析EV对孤岛微网备用容量的影响。

1 EV能量管理模式

1.1 EV能量管理目标

本文建立2种EV管理模式, 调度EV进行有序

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2016-05-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAG19B02); 上海市自然科学基金资助项目(13ZR1444400); 上海市科委资助项目(13DZ1200403)

Project supported by the National Science and Technology Support Project of China(2015BAG19B02), the Natural Science Foundation of Shanghai(13ZR1444400) and Shanghai Committee of Science and Technology(13DZ1200403)

充电和有序充放电。假设所有停靠在微网内的 EV 服从微网调度,且功率连续可调^[16]。首先,制定 EV 充放电电价引导机制^[17]:

$$C_t^{\text{ch}} = C_k C_{o,t} \left(\frac{P_{\text{base},t} + P_{\text{ref},t}^{\text{ch}}}{P_{o,t}} \right)^2 \quad (1)$$

$$C_t^{\text{dis}} = C_k C_{o,t} \left(\frac{P_{\text{base},t} - P_{\text{ref},t}^{\text{dis}}}{P_{o,t}} \right)^2 \quad (2)$$

其中, C_t^{ch} 为 t 时段 EV 的充电价格; C_t^{dis} 为 t 时段 EV 放电的上网电价; $P_{\text{base},t}$ 、 $P_{\text{ref},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ref},t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段基础负荷及所有 EV 总充、放电功率; $C_{o,t}$ 为 t 时段负荷功率达到设定值 $P_{o,t}$ 时的电网电价; C_k 为调节系数。

在 EV 有序充电模式下,从 EV 集群利益出发,最小化所有 EV 的全天总充电成本 C_{EV} ,时间步长取 1 h,如下:

$$C_{\text{EV}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{t=1}^N C_t^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} \quad (3)$$

其中, N 为 EV 的总数; $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 为第 i 辆 EV t 时段内的充电功率。

在有序充放电模式下, EV 放电参与调峰,导致使用寿命衰减和电池电量损耗。电池寿命损耗成本是微网调用 EV 电池调峰引起的,由微网运营商承担; 电池电量损耗成本是 EV 充放电效率达不到 100% 引起的,体现在 EV 增加的充电成本中。因此,微网运营商需对 EV 放电进行补贴, EV 上网补贴电价取单位发电量电池寿命损耗成本 C_{deg} ,取 0.42 元/(kW·h)^[18]。

EV 放电电池寿命损耗成本和上网补贴收益相抵消,以所有 EV 充电成本、上网收入之差作为 EV 集群全天综合成本 C_{EV}^Z ,最小化该成本,则有:

$$C_{\text{EV}}^Z = \sum_{i=1}^{24} \sum_{t=1}^N (C_t^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - C_t^{\text{dis}} P_{i,t}^{\text{dis}}) \quad (4)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 为第 i 辆 EV t 时段的放电功率。

1.2 EV 运行约束条件

假设所有 EV 充放电特性相同,满足以下约束。

a. 电池充放电功率限制:

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq P_N \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq P_N \quad \forall i, t \quad (6)$$

其中, P_N 为 EV 额定充放电功率。

b. EV 电池荷电状态约束:

$$\text{soc}_{i,\min} \leq \text{soc}_{i,t} = \text{soc}_{i,t-1} - \frac{P_{i,t}^{\text{dis}}}{\eta_{\text{dis}} E_N} + \frac{\eta_{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}}}{E_N} \leq \text{soc}_{i,\max} \quad \forall i, t \in [t_{i,s}+1, t_{i,e}] \quad (7)$$

$$\text{soc}_{i,\min} \leq \text{soc}_{i,t_{i,e}} = \text{soc}_{i,\text{exp}} \leq \text{soc}_{i,\max} \quad \forall i \quad (8)$$

其中, $\text{soc}_{i,t}$ 为第 i 辆 EV 在 t 时段的荷电状态; $t_{i,s}$ 、 $t_{i,e}$ 分别为第 i 辆 EV 开始停靠时刻、结束停靠时刻; $\text{soc}_{i,t_{i,s}}$ 、 $\text{soc}_{i,\min}$ 和 $\text{soc}_{i,\max}$ 分别为第 i 辆 EV 的初始、最小和最大荷电状态; $\text{soc}_{i,\text{exp}}$ 为第 i 个 EV 用户停靠结束时的电池期望荷电状态; E_N 为单台 EV 的电池额

定容量; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为 EV 充、放电效率。

c. 非停靠时段约束:

$$P_{i,t}^{\text{ch}} = P_{i,t}^{\text{dis}} = 0 \quad i \in \Omega_t \quad (9)$$

其中, Ω_t 为 t 时段内驶离微网的 EV 集合。

d. 充放电不同时进行约束:

$$P_{i,t}^{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{dis}} = 0 \quad \forall i, t \quad (10)$$

2 BESS 选址定容模型

2.1 BESS 配置目标

以微网内一日 BESS 投资成本 C_I 和运行成本之和作为一日综合成本 C ,最小化该成本,建立优化模型,其中微网一日运行成本包含 C_M 、 C_P 、 C_E 、 C_V ,如下:

$$C = C_I + C_M + C_P + C_E + C_V \quad (11)$$

a. BESS 每日投资成本 C_I :

$$C_I = \frac{1}{365} \frac{d(1+d)^{y_b}}{(1+d)^{y_b} - 1} K_b^{\text{inv}} E_b \sum_{j=1}^J S_j \quad (12)$$

其中, d 为折现率; y_b 为 BESS 模块寿命; K_b^{inv} 为 BESS 单位容量投资成本,元/(kW·h); E_b 为 BESS 单个模块的额定电量; S_j 为整数变量,表示 j 节点安装 BESS 模块的个数,若取值为 0,则 j 节点不作为储能的选址,否则 j 节点安装 $S_j E_b$ 容量的储能; J 为系统节点总个数。

b. 风/光/储维护成本 C_M :

$$C_M = \sum_{i=1}^{24} (K_{\text{WT}}^{\text{om}} P_{\text{WT},i} + K_{\text{PV}}^{\text{om}} P_{\text{PV},i}) + \sum_{i=1}^{24} \left[K_b^{\text{om}} \sum_{j=1}^J (P_{j,i}^{\text{ch}} + P_{j,i}^{\text{dis}}) \right] \quad (13)$$

其中, $K_{\text{WT}}^{\text{om}}$ 、 $K_{\text{PV}}^{\text{om}}$ 、 K_b^{om} 分别为风机、光伏、BESS 单位电量运行维护成本; $P_{\text{WT},i}$ 、 $P_{\text{PV},i}$ 分别为 t 时段风机、光伏发电功率; $P_{j,i}^{\text{ch}}$ 、 $P_{j,i}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段 j 节点所有 BESS 模块整体的充、放电功率。

c. 微网购电成本 C_P :

$$C_P = \sum_{i=1}^{24} p_i \max(P_{g,i}, 0) \quad (14)$$

其中, $P_{g,i}$ 为 t 时段微网与大电网的交互功率,为正表示大电网向微网输电,为负表示微网向大电网输电; p_i 为 t 时段购电电价。

d. 环境成本 C_E :

$$C_E = \sum_{i=1}^{24} \sum_{w=1}^W 10^{-3} (\beta_w + V_w) \alpha_{gw} \max(P_{g,i}, 0) \quad (15)$$

其中, W 为污染物种类总数; β_w 为污染物 w 的排放罚款,元/kg; V_w 为污染物 w 的环境价值^[19],元/kg; α_{gw} 为大电网对应的污染物 w 排放系数, g/(kW·h)。

e. EV 调峰成本 C_V :

EV 有序充放电时,微网运营商需支付 EV 调峰费用。 C_V 包含支付给 EV 放电的上网费用以及补偿 EV 因放电引起的寿命损耗费用,如下:

$$C_V = \sum_{i=1}^{24} \sum_{t=1}^N (C_t^{\text{dis}} + C_{\text{deg}}) P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (16)$$

2.2 BESS 限制

2.2.1 BESS 安装限制

$$0 \leq S_j \leq S_j^{\max} \quad (17)$$

$$\sum_j S_j \leq S_b^{\max} \quad (18)$$

其中, S_j^{\max} 为 j 节点最大可安装 BESS 模块数; S_b^{\max} 为总的安装模块数上限。

2.2.2 BESS 运行限制

为切合实际储能运行特点,不致使得 BESS 调节模型过于复杂,将安装在同一节点的 BESS 模块统一控制,同一节点的 BESS 模块输入输出功率相同。每个节点 BESS 整体的最大允许充放电功率与安装个数成正比,且任一时刻充放电不能同时进行,如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{ch}} \leq S_j P_N^{\text{ch}} F_{\text{ch},t} \\ 0 \leq P_{j,t}^{\text{dis}} \leq S_j P_N^{\text{dis}} F_{\text{dis},t} \\ F_{\text{ch},t} + F_{\text{dis},t} \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

其中, P_N^{ch} 、 P_N^{dis} 分别为 BESS 模块的额定充、放电功率; $F_{\text{ch},t}$ 、 $F_{\text{dis},t}$ 分别为 t 时段 j 节点 BESS 充、放电状态标志,为 0-1 变量。式(19)中前两式保证每个节点 BESS 的充、放电功率不超过额定功率;第三式保证任一时段 BESS 只处于充电、放电或不充不放状态中的一种,而不存在既充电又放电的物理不可行现象。

为防止 BESS 过充过放,以及保证使用寿命和孤岛时 BESS 有电可供,将其实际使用范围设为 30%~95%。为保证下一周期 BESS 具有相同调节性能,避免人为指定初始荷电量造成片面性,本周期初始荷电量与下一周期的初始荷电量相等。BESS 荷电量的时段间耦合约束如下:

$$\begin{cases} E_{j,t-1} + P_{j,t}^{\text{ch}} \eta_{\text{bch}} - (P_{j,t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{bdis}}) = E_{j,t} & t=2,3,\dots,24 \\ E_{j,24} + P_{j,1}^{\text{ch}} \eta_{\text{bch}} - (P_{j,1}^{\text{dis}} / \eta_{\text{bdis}}) = E_{j,1} \\ 30\% S_j E_b \leq E_{j,t} \leq 95\% S_j E_b & t=1,2,\dots,24 \end{cases} \quad (20)$$

其中, $E_{j,t}$ 为 t 时段 j 节点 BESS 荷电量; η_{bch} 、 η_{bdis} 分别为 BESS 模块的额定充、放电效率。

2.2.3 网络安全限制

a. 功率平衡约束:

$$\sum_{k \in l(j,k)} P_{l(j,k),t} = P_{j,t}^{\text{g}} - P_{j,t}^{\text{d}} - (P_{j,t}^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{dis}}) - \sum_{i \in j} (P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{dis}}) \quad (21)$$

$$\sum_{k \in l(j,k)} Q_{l(j,k),t} = Q_{j,t}^{\text{g}} - Q_{j,t}^{\text{d}} \quad (22)$$

$$\begin{cases} P_{l(j,k),t} = G_l U_{j,t}^2 - U_{j,t} U_{k,t} (G_l \cos \theta_{jk,t} + B_l \sin \theta_{jk,t}) \\ Q_{l(j,k),t} = -(B_l + B_l^s / 2) U_{j,t}^2 + U_{j,t} U_{k,t} (B_l \cos \theta_{jk,t} - G_l \sin \theta_{jk,t}) \end{cases} \quad (23)$$

其中, $P_{j,t}^{\text{d}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{g}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{d}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{g}}$ 分别为 t 时段 j 节点的负荷、发电有功和无功功率; $i \in j$ 表示第 i 辆 EV 接于 j 节点; $l(j,k)$ 表示连接节点 j 和 k 的线路 l ; $P_{l(j,k),t}$ 、 $Q_{l(j,k),t}$ 分别为 t 时段由节点 j 流向节点 k 的有功、无功功率; G_l 、 B_l 分别为线路 l 的电导和电纳; B_l^s 为线路 l 的对地电纳; $U_{j,t}$ 为 t 时段 j 节点的电压; $\theta_{jk,t}$ 为 t 时段 j 和 k 节点之间的相角差。

b. 节点电压约束:

$$U_j^{\min} \leq U_{j,t} \leq U_j^{\max} \quad (24)$$

其中, U_j^{\min} 、 U_j^{\max} 分别为节点 j 电压最小值、最大值。

c. 支路潮流约束:

$$0 \leq |P_{l(j,k),t}| \leq P_{l(j,k)}^{\max} \quad (25)$$

其中, $P_{l(j,k)}^{\max}$ 为线路 l 允许流过的最大有功功率。

d. 联络线交互功率约束:

$$0 \leq |P_{g,t}| \leq P_g^{\max} \quad (26)$$

其中, P_g^{\max} 为最大允许交互功率。

e. 微网孤岛备用约束:

假设 t 时段微网进入孤岛,考虑极端天气情况,风光输出功率均为 0,微网内关键负荷全部由 BESS 和 EV 供给。BESS 最大放电深度为 90%;为防止过放及保证 EV 续航能力, EV 最大放电深度为 80%。因此 t 时段由 BESS 和 EV 群提供的备用容量 R_t 和可用功率 P_t 应满足如下条件:

$$\begin{aligned} R_t = & \sum_i u_{i,t} \max \{ (\text{soc}_{i,t} - 0.2) E_N, 0 \} + \\ & \sum_j (E_{j,t} - 0.1 S_j E_b) \geq P_{\text{cl}} T \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} P_t = & \sum_i u_{i,t} \min \{ \max [(\text{soc}_{i,t} - 0.2) E_N \eta_{\text{dis}}, 0], P_N \} + \\ & \sum_j \min \{ (E_{j,t} - 0.1 S_j E_b) \eta_{\text{bdis}}, S_j P_N^{\text{dis}} \} \geq P_{\text{cl}} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $u_{i,t}$ 为第 i 辆 EV t 时段停靠状态,停靠取 1,离开取 0; P_{cl} 为关键负荷功率; T 为孤岛运行时间。

上述储能选址定容问题实际是一个交流最优潮流 ACOPTF (Alternating Current Optimal Power Flow) 问题。为简化计算,将其近似处理为直流最优潮流 DCOPTF (Direct Current Optimal Power Flow)。节点电压近似于 1 p.u., 线路相角差很小,并忽略线路对地电纳,则式(23)简化如下:

$$\begin{cases} P_{l(j,k),t} \approx -B_l \theta_{jk,t} \\ Q_{l(j,k),t} \approx 0 \end{cases} \quad (29)$$

2.3 模型求解

该选址定容模型是一个包含连续变量和离散变量的 MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming), 其中连续变量包括每时段各节点 BESS 充放电功率、各节点电压、相角、联络线交互功率,离散变量包括各节点安装的 BESS 模块数量、BESS 充放电状态标志。该问题的求解难点如下:(1)优化变量多,既包含实数变量,又包含整数变量和二进制变量;(2)目标函数和约束条件非线性、等式约束复杂,变量之间相互制约,特别是潮流方程为二次等式形式,是导致该模型难求解的强非凸源。因此,模块化电池储能系统选址定容模型是一个大规模的混合整数非凸非线性规划问题,属于 NP (Non-deterministic Polynomial) 难题。

智能算法由于其本身的随机性,求解这类大规模非凸 MINLP 问题计算效率不高。而目前有部分商

用和开源优化软件可提供该类问题的启发式解^[20]。其中,KNITRO 求解器采用并行多起点搜索策略、启发式割平面和分支定界法,寻找非凸 MINLP 问题更好的优化解,具有初始智能化和快速可行性检测等优点,求解大规模问题效率高、鲁棒性好,因此本文采用 AMPL(A Mathematical Programming Language)和 KNITRO 9.0 启发式分支定界法求解^[21]。

3 算例分析

3.1 算例参数

3.1.1 微网参数

采用文献[22]提出的 FREEDM 微网模型,如图 1 所示,系统额定电压 10 kV,允许电压偏移 5%,节点 1 为平衡节点,节点 2、3、6、8 为 PV 节点,其余为 PQ 节点,视在功率基准值 1 MV·A,其配置、线路和基础负荷参数分别见表 1、表 2,表 2 中阻抗参数均为标幺值。典型日总发电和负荷功率曲线见图 2。风电、光伏采用最大功率点跟踪控制。联络线最大交互功率为 500 kW,关键负荷占基础负荷的 15%,孤岛时间取 5 h。微网购电电价采用上海市峰平谷时电价,列于表 3。电力行业污染物环境评价标准见表 4^[19],大电网污染物排放系数见表 5^[23]。风电、光伏和储能的运行维护成本分别取 0.029 6、0.009 6、0.009 元/(kW·h)^[24]。折现率取 8%。式(1)、式(2)中 $C_{o,r}=0.307$ 元/(kW·h)、 $P_{o,r}=100$ kW^[17],调节系数 $C_k=0.05$ 。

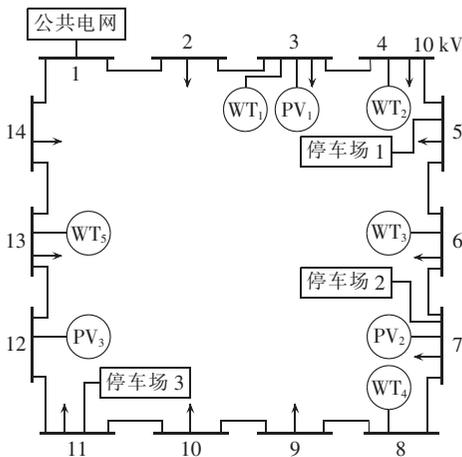


图 1 FREEDM 结构图

Fig.1 Structure of FREEDM

表 1 FREEDM 配置

Table 1 Configuration of FREEDM

停车场配置节点	容纳 EV 数量/辆	风机		光伏	
		配置节点	额定功率/kW	配置节点	额定功率/kW
5	10	3	315	3	140
		4	105		
7	20	6	105	7	280
		8	210		
11	30	13	105	12	140

表 2 FREEDM 节点额定负荷和线路参数

Table 2 Rated load of FREEDM nodes and parameters of lines

节点	额定负荷/kW	线路	电阻	电抗	对地电纳
1	0	1-2	0.00019	0.00592	0.0528
2	80	2-3	0.00047	0.00198	0.0492
3	270	3-4	0.00067	0.00171	0.0128
4	170	4-5	0.00033	0.00042	0.0438
5	60	5-6	0.00043	0.00252	0.0340
6	40	6-7	0.00043	0.00199	0.0346
7	42	7-8	0.00023	0.00176	0.0228
8	0	8-9	0.00013	0.00260	0.0345
9	80	9-10	0.00032	0.00085	0.1704
10	50	10-11	0.00082	0.00192	0.1921
11	84	11-12	0.00082	0.00192	0.2000
12	0	12-13	0.00221	0.00200	0.3480
13	54	13-14	0.00171	0.00348	0.3480
14	70	14-1	0.00019	0.00348	0.3480

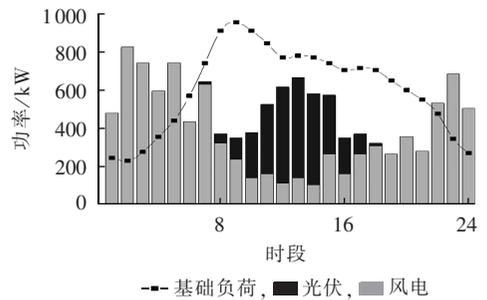


图 2 典型日功率曲线

Fig.2 Typical daily power curves

表 3 上海市峰平谷时电价

Table 3 Peak, ordinary and valley electricity prices of Shanghai

时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰时段 08:00—11:00, 18:00—21:00	1.197
平时段 06:00—08:00, 11:00—18:00, 21:00—22:00	0.744
谷时段 22:00 至次日 06:00	0.356

表 4 电力行业污染物环境评价标准

Table 4 Environment evaluation standard for pollutants of power industry

污染物	环境价值	罚款
NO _x	6.4795	1.6199
CO ₂	0.0186	0.0081
CO	0.8099	0.1296
SO ₂	4.8596	0.8099

表 5 污染排放系数

Table 5 Pollution emission coefficient

污染物	排放系数/[g·(kW·h) ⁻¹]	污染物	排放系数/[g·(kW·h) ⁻¹]
NO _x	1.6	CO	0.124
CO ₂	889	SO ₂	1.8

3.1.2 EV 参数

微网内共有 3 个居民停车场,假设每天有 60 辆 EV 需接入微网充电,通过双向充电桩接入微网。参

考 BYD E6 车型,锂电池额定容量理论值为 $64\text{ kW}\cdot\text{h}$,额定充放电功率为 7 kW ,充放电效率为 90% ,EV 的停靠曲线如图 3 所示^[17]。根据停靠率确定每时刻停靠在微网的 EV 数量,运用轮盘赌法确定每时刻驶离微网的 EV,从而确定每辆 EV 开始停靠和结束停靠时刻。为防止电池过充过放,荷电状态 SOC(State Of Charge)上限、下限分别设置为 95% 和 20% 。假设 EV 初始 SOC 服从正态分布 $N(0.5, 0.4^2)$ 并且在 $[0.2, 0.95]$ 内,并采用蒙特卡罗法模拟。

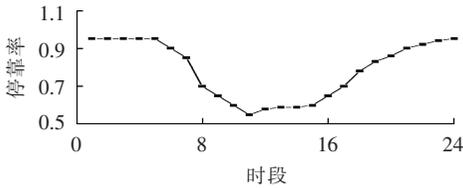


图 3 微网内汽车平均停靠率

Fig.3 Average parking rate of vehicles in microgrid

3.1.3 BESS 参数

考虑到钠硫电池能量和功率密度高、效率高、维护方便、环境友好等优点,且钠硫电池具有较好的负荷波动响应特性,故选用钠硫电池组作为 BESS^[23]。钠硫电池模块单元 U_1 为 $5\text{ kW}/40\text{ kW}\cdot\text{h}$,充放电效率为 90% ,使用寿命 15 a ,单位容量投资成本 $3000\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[25]。在优化过程中,BESS 接入位置没有限制。

3.2 仿真结果

3.2.1 2 种 EV 管理模式下车场功率比较

通过电价引导机制激励,各停车场充放电功率见图 4。EV 有序充电模式在负荷谷时充电,有序充放电模式还在峰时放电调峰,负荷峰谷差由 725 kW 分别降至 482 kW 、 380 kW ,2 种模式均有效降低了微网负荷峰谷差,缓解了电力供需矛盾,使负荷曲线更平坦。而且如表 6 所示,相比 EV 有序充电模式,EV 集群有序充放电每天可少支出 47.84 元 ,因此,有序充放电模式更有利于微网和 EV 集群共赢。

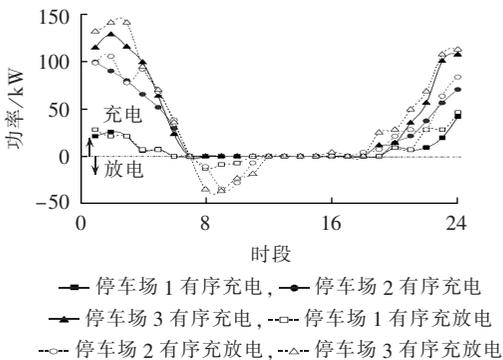


图 4 停车场充/放电功率

Fig.4 Charging/discharging power of parking lots

表 6 2 种 EV 管理模式下 EV 成本和收益

Table 6 Costs and benefits of EV for two EV management modes

参数	EV 管理模式	
	有序充电	有序充放电
EV 充电成本	678.31	879.91
EV 电池寿命损耗成本	0	92.87
EV 放电上网收益	0	249.44
EV 放电上网补贴	0	92.87

3.2.2 DCOPF 与 ACOPF 储能配置比较

表 7 给出 DCOPF 与 ACOPF 2 种潮流处理方法计算出的 BESS 配置结果。其中, $(6, 1 \times U_1)$ 表示节点 6 安装 1 个 BESS 模块,其他类似。有序充电模式下,DCOPF 使得非线性潮流线性化,而且减少了所需处理的变量,计算时间相对 ACOPF 减少了 82.7% 。由于 DCOPF 在潮流计算中忽略了网损,使得 BESS 总配置容量偏小。对于 BESS 这种能量型储能而言,较少的功率缺额可能会导致 BESS 容量的急剧增大,因此后续计算均采用 ACOPF 方法。

表 7 EV 管理模式和潮流算法对 BESS 配置影响

Table 7 Impact of EV management modes and power flow algorithms on BESS configuration

参数	DCOPF	ACOPF	ACOPF
EV 管理模式	有序充电	有序充电	有序充放电
BESS 最优配置方案	$(6, 1 \times U_1),$ $(8, 21 \times U_1)$	$(2, 14 \times U_1),$ $(4, 1 \times U_1),$ $(13, 1 \times U_1),$ $(14, 19 \times U_1)$	$(1, 6 \times U_1),$ $(3, 3 \times U_1),$ $(5, 11 \times U_1)$
总网损电量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	—	1645.19	1644.50
综合成本/元	5538.70	7118.09	7109.55
计算时间/s	530.25	3064.62	3716.43

3.2.3 2 种 EV 管理模式下的 BESS 配置

当 EV 采用 2 种不同管理模式时,BESS 配置亦列于表 7 中。

EV 有序充放电时,由于停车场 1、2、3 在负荷峰时提供放电服务,缓解了周边区域的缺电现象,相比有序充电,该模式所需配置的 BESS 模块数量减少近 43% ,微网一日总网损和综合成本也略有下降,因此采用 EV 有序充放电模式进行 BESS 配置具有更好的经济效益。

2 种 EV 管理模式分别按照表 7 配置 BESS 后,FREEDM 微网受网络约束,网损处于较高水平,夜间轻载时网损更严重,如图 5 所示。

在没有配置 BESS 的情况下,2 种模式下联络线最大功率分别达到 672.65 kW 和 593.64 kW 。通过配置 BESS,联络线交互功率被严格限制在 500 kW 以内。

夜间 2、3 时段,由于 BESS 和 EV 充电消纳部分过剩风电,向大电网输送功率减少,微网内可再生能源发电自用率增加。因此结合 EV 有序充电和有序充放电模式配置 BESS,可有效减弱微网对大电网的

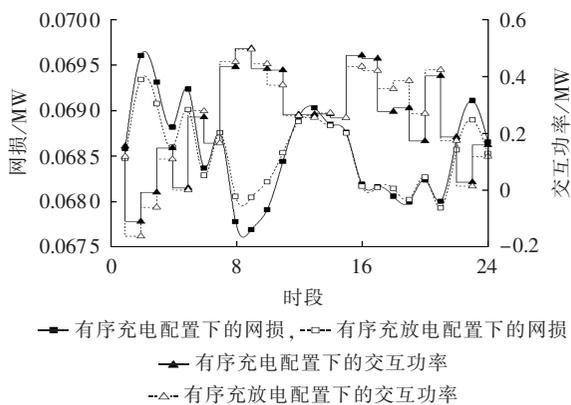


图 5 2 种 EV 管理模式下的网损和交互功率

Fig.5 Network loss and interactive power of two EV management modes

依赖,增强微网的自发自用能力。

如图 6 所示,在峰时 9—11 时段,有序充电模式下 BESS 放电功率更大,就地平衡负荷较多,缓解了线路传输负担,降低了峰时网损。2 种 EV 管理模式,各节点配置的 BESS 荷电状态均处于 0.3~0.95,一日内仅需调度 BESS 进行 2 次充放电。各配置节点 BESS 的荷电状态均达到 95%,说明所配置的 BESS 得到有效利用,没有冗余配置。

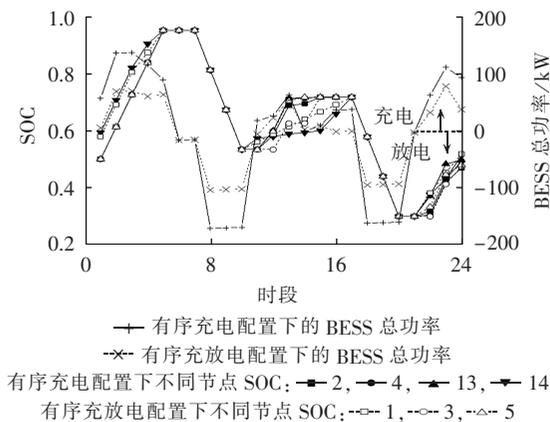


图 6 2 种 EV 管理模式下各节点 BESS 的 SOC 和功率

Fig.6 SOC and output power of BESS in two EV management modes for different nodes

如图 7 所示(图中纵轴均为标么值),配置 BESS 后的微网,节点电压偏移均控制在 5% 之内,标准差较小,电压稳定,满足微网运行电压要求。

3.2.4 孤岛备用和可用功率

比较 EV 对孤岛微网持续供电能力的影响,分别对 2 种 EV 管理模式下的 BESS 配置工况进行计算。

在没有 EV 参与孤岛运行时,仅由 BESS 提供备用容量。如图 8 所示,由于孤岛发生时刻不同,BESS 所剩容量不同,显然某些时刻不能满足关键负荷运行 5 h 的要求,而且有序充放电模式下配置的 BESS 最大输出功率为 100 kW,不能保证关键负荷全部供电。

在 EV 参与孤岛运行时,由 EV 和 BESS 供给的

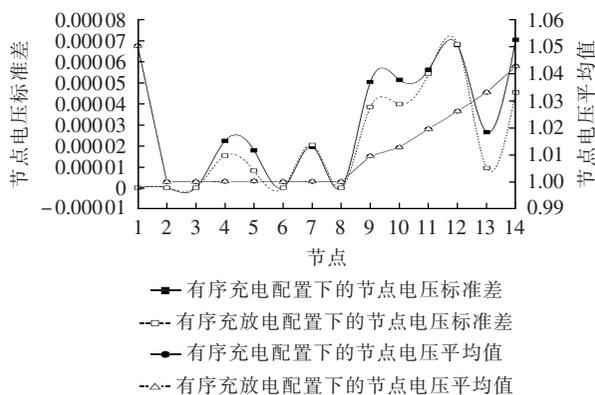


图 7 2 种 EV 管理模式下节点电压标准差和均值

Fig.7 Standard deviation and mean of nodal voltage in two EV management modes

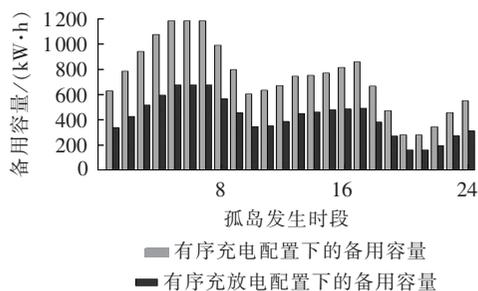


图 8 仅 BESS 供电时孤岛备用容量

Fig.8 Reserve capacity supplied only by BESS in islanded microgrid

备用容量和可用功率如图 9 所示。由于 11 时段 EV 停靠数量最少,且 BESS 在此前的高峰时刻大功率放电,所剩电量不多,因此在 11 时段进入孤岛状态最危险。但相比没有 EV 参与孤岛工况,此刻仍能满足关键负荷功率需求,提供充裕的备用容量。因此充分挖掘 EV 向电网返送电能,可显著提高微网备用容量,增强供电可靠性。

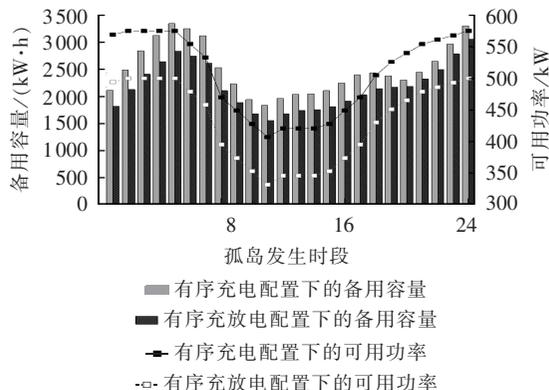


图 9 BESS 和 EV 联合供电时孤岛备用容量和可用功率

Fig.9 Reserve capacity and available power supplied by BESS and EVs in islanded microgrid

4 结论

针对并网型微网内 EV 接入和 BESS 模块化封装设计问题,提出了考虑 EV 能量管理、BESS 容量高

散、荷电量时段间耦合的储能选址定容模型及求解方法。

仿真计算表明:ACOPF方法可精确计算微网储能模块的安装数量和位置。论文通过一个典型的微网配置,仿真验证了EV的能量管理模式直接影响微网储能容量的大小及位置。微网孤岛运行时,EV的加入与有序管理,可有效增加系统备用容量、提高供电能力。

本文工作为含EV的微网储能计算和规划提供了参考。

参考文献:

- [1] 窦晓波,袁简,吴在军,等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):26-32.
DOU Xiaobo,YUAN Jian,WU Zaijun,et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):26-32.
- [2] 钟宇峰,黄民翔,叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):114-121.
ZHONG Yufeng,HUANG Minxiang,YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):114-121.
- [3] 苗铁群,江全元,曹一家. 考虑电动汽车及换电站的微网随机调度研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):18-24,39.
MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Microgrid stochastic dispatch considering electric vehicles and battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):18-24,39.
- [4] 苗铁群,江全元,曹一家. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):1-7.
MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):1-7.
- [5] 吴红斌,郭彩云. 计及电动汽车的分布式发电系统储能单元优化配置[J]. 中国电机工程学报,2012,32(增刊1):15-21.
WU Hongbin,GUO Caiyun. Capacity optimization of energy storage unit in distribution generation system considering electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(Supplement 1):15-21.
- [6] 苏粟,蒋小超,王玮,等. 计及电动汽车和光伏-储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):164-171.
SU Su,JIANG Xiaochao,WANG Wei,et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):164-171.
- [7] CHEN Changsong,DUAN Shanxu,CAI Tao,et al. Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(10):2762-2773.
- [8] CHEN S X,GOOI H B,WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):142-151.
- [9] WEN Shuli,LAN Hai,FU Qiang,et al. Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(2):1-9.
- [10] 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.
YOU Yi,LIU Dong,ZHONG Qing,et al. Multi-objective optimal placement of energy storage systems in an active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(18):46-52.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] NICK M,CHERKAOUI R,PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(5):2300-2309.
- [15] TAYLOR O A,HOVER F S. Convex model of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(3):1407-1413.
- [16] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.
ZHAN Kaiqiao,SONG Yonghua,HU Zechun,et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):11-18.
- [17] ZHANG Mingrui,CHEN Jie. The energy management and optimized operation of electric vehicles based on Microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(3):1427-1435.
- [18] WHITE C D,ZHANG K M. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction[J]. Journal of Power Sources,2011,196(8):3972-3980.
- [19] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):17-25.
MA Xiyuan,WU Yaowen,FANG Hualiang,et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):17-25.
- [20] ZHANG Hui,VITTAL V,HEYDT G T,et al. A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):1125-1133.
- [21] Artelys. Artelys knitro documentation release 10.0.1[EB/OL]. [2016-03-03]. http://www.artelys.com/downloads/pdf/composants-numeriques/knitro/Knitro_10_0_UserManual.pdf.
- [22] 张明锐,陈洁,杜志超,等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1013-1023.
ZHANG Mingrui,CHEN Jie,DU Zhichao,et al. Economic opera-

- tion of Micro-grid considering regulation of interactive power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [23] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including NaS battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [24] 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.
- DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [25] 廖强强, 陆宇东, 周国定, 等. 基于削峰填谷的钠硫电池储能系统技术经济分析[J]. 电力建设, 2014, 35(4): 111-115.
- LIAO Qiangqiang, LU Yudong, ZHOU Guoding, et al. Technical

and economic analysis on NaS battery energy storage system based on peak shaving[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(4): 111-115.

作者简介:



张明锐

张明锐(1971—), 男, 甘肃民勤人, 副教授, 博士, 研究方向为分布式发电与微网技术、电力系统能量管理与优化运行、轨道交通牵引供电系统(E-mail: zmr@tongji.edu.cn);

谢青青(1990—), 女, 江苏高淳人, 硕士研究生, 研究方向为微网能量管理与优化运行;

欧阳丽(1975—), 女, 湖南永州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为分布式能源集成应用。

Sizing and siting of BESS for grid-connected microgrid with electric vehicles

ZHANG Mingrui¹, XIE Qingqing¹, OUYANG Li²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Central Academe Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Based on the grid-connection of EVs(Electric Vehicles) and the modular design of BESS(Battery Energy Storage System), the energy management of EV and the optimal allocation and operation of BESS are researched for the grid-connected microgrid. Two kinds of electricity price guide mechanism are introduced, and the coordinated EV charging mode and the coordinated EV charging & discharging mode are established. The installed capacity of nodal BESS is discretized, and a sizing and siting model of BESS is built, which takes the minimum sum of daily BESS investment cost and operational cost as its objective and considers the BESS energy constraint coupled between adjacent intervals. With the KNITRO solver, the DCOPTF(Direct Current Optimal Power Flow) method and the ACOPTF(Alternating Current Optimal Power Flow) method are applied respectively to solve the MINLP(Mixed Integer NonLinear Programming) problem. Simulative results show that, the ACOPTF method can accurately configure the modular quantity of BESS and their sites, the BESS capacity needed in the coordinated EV charging & discharging mode is dramatically smaller than that in the coordinated EV charging mode, the participation of EV in the islanded microgrid can enhance the redundancy of reserve capacity and the reliability of microgrid operation.

Key words: battery energy storage system; sizing and siting; electric vehicles; energy storage; energy management; mixed integer nonlinear programming; microgrid

(上接第 24 页 continued from page 24)

Defects of measures against PT fuse melting in distribution network and research of new measure

LIANG Zhirui¹, ZHAO Mengya¹, NIU Shengsu¹, LIU Haisheng², LIANG Shuang², GUO Yacheng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Baoding Electric Power Supply Company, Baoding 071000, China)

Abstract: A mathematic model of 10 kV power distribution system is established with ATP-EMTP and the voltage and current waveforms during the ferroresonance or low-frequency nonlinear oscillation are simulated. The existing measures to prevent the PT(Potential Transformer) fuses melting are simulated and compared. Their defects are analyzed and a countermeasure is proposed, which connects the neutral point of PT to ground via, in parallel, a correction PT and a resonance eliminator or linear resistor. The resonance eliminator or linear resistance is used to suppress the over-current and consume the resonance energy, while the correction PT to correct the measuring error of the secondary voltage. The results of high-voltage simulation test verify that the proposed measure has better resonance cancellation effect.

Key words: electromagnetic voltage transformer; fuse; ferroresonance; low-frequency nonlinear oscillation; ATP-EMTP; distribution network; resonance cancellation