

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200625

# 区域储能站参与扰动平抑的配电网多时间尺度自律策略

陈岩, 靳伟, 王文宾, 李会彬, 李征

(国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001)

**摘要:** 为降低新能源发电随机不确定性导致配电网对主电网的强烈功率扰动, 提高电力系统新能源多层次有序消纳能力, 提出了新能源配电网利用储能站及可控资源实施区内自律管控的输配协调消纳策略。阐述了配电网自律运行实施策略, 分别从短、中及长时间尺度建立描述配电网区域自律运行指标及相关计算方法。提出短时间尺度储能站功率扰动的平抑策略及基于储能、需求侧响应和网络重构手段的中、长时间尺度配电网自律运行策略。为合理调节储能站荷电状态, 提出改善荷电状态的区域储能电站修正策略。以河北省某区域配电网为算例进行仿真分析, 结果证明了所提方法的有效性及其合理性。

**关键词:** 配电网; 储能站; 新能源消纳; 自律运行; 功率扰动

## Regional energy storage stations participate in disturbance stabilization of a distribution network multi-time-scale self-discipline operation strategy

CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, LI Huibin, LI Zheng

(Xingtai Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Xingtai 054001, China)

**Abstract:** In order to reduce the power disturbance caused by the random uncertainty of new energy generation and improve the multi-level orderly absorption capacity of new energy in a power system, this paper puts forward the strategy of a new energy distribution network to use energy storage stations and controllable resources to implement regional autonomous control of transmission and distribution coordination and absorption. First, we describe the implementation strategy of autonomous operation of the distribution network, and establish regional autonomous operation indices and relevant calculation methods for short, medium and long time-scales. The power disturbance suppression strategy for a short-time-scale energy storage station and the self-regulated operation strategy of medium and long-term time-scale distribution network based on energy storage, demand response and network reconstruction are proposed. In order to adjust the charge state of the energy storage station reasonably, a correction strategy of improving the charge state of the regional energy storage station is put forward. Finally, a regional distribution network in Hebei province is taken as an example to carry out simulation analysis and verify the effectiveness and rationality of the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807172) and the Science and Technology Project of Xingtai Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.

**Key words:** distribution network; energy storage station; new energy consumption; self-discipline operation; power disturbance

## 0 引言

目前新能源发电已进入规模化应用阶段, 大量分布式风、光新能源涌入配电网。新能源出力的随机波动性引起配电网严重的功率扰动, 不但影响配

电网自身的电压质量, 而且大量扰动传导至主电网将增加主电网的运行压力。主电网的功率扰动需要通过调峰、调频备用容量来平衡, 频繁的功率扰动严重影响主电网的经济、安全运行; 而且随着新能源替代传统能源, 电网惯性和调频能力被削弱, 功率扰动引起的频率波动更加明显<sup>[1-4]</sup>。因此, 从全网角度对功率扰动在输配电各层次进行合理分担、有序消纳, 是解决新能源大规模并网的必要手段。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51807172); 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司科技项目

目前, 关于新能源消纳技术手段的研究已有较多成果。文献[5]以减少跨区功率倒送, 提高就地消纳水平为目标提出一种以服务于规划的可再生能源集群划分方法。文献[6]提出配网分层优化调度体系, 以各区域与主网交换功率的可调度性为目标建立计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制模型。文献[7]提出基于源-网-荷协同优化的配电网光储联合规划方法, 兼顾区域光储系统投资收益同时能够提高主动配电网光伏消纳能力。文献[8]提出一种提升分布式电源接纳能力的配电网鲁棒动态重构, 对分布式电源与储能选址定容及网络拓展、动态重构进行多阶段规划。文献[9]以提高新能源消纳量为目标, 提出含新能源与负荷曲线相似度与波动度约束的源荷储协调优化模式。文献[10]构建了用于调压、调峰、提供备用等面向多应用需求的分布式储能优化调度模型。文献[11]针对新能源消纳与反调峰特性之间的矛盾, 提出含虚拟储能的高渗透新能源电网深度调峰备用决策模型。上述文献深入研究了新能源消纳背景下配电网源-荷-储协调运行及优化配置策略, 充分证明电网中配置储能可有效缓解新能源规模化接入造成的不利影响。

储能具有充放电效率高、响应速度快等优点, 能够有效实现功率和能量的时间域动态迁移。区域变电站是配电网接入主电网的并网关口。随着区域变电站一次设备由户外型逐步改造更换为组合电器设备, 其占地面积大幅减少, 剩余土地可用来建设区域储能站。区域储能站显著降低了建设和运维检修成本, 而且所处位置在信息和能量的交互上具有更大优势, 调控能力和运行灵活性更加显著。利用区域储能站的关口地位结合配网源荷可控资源, 按主电网的需要对配电网关口功率进行多时间尺度扰动平抑, 使配电网成为一个具有自律性和可调控能力的智能节点。这种运行模式可实现主、配分层分区自治自律协同调控和功率扰动的多层次合理分担、有序平抑。

本文基于配电网自律管控思想, 研究利用储能站与配网可控资源平抑区域功率扰动的自律运行策略。首先, 阐述了配电网自律运行调控模式, 分别从短、中及长时间尺度建立描述配电网区域自律运行指标及相关计算方法; 在此基础上, 以配电网自律运行指标为判据, 提出短时间尺度储能站功率扰动的平抑策略及基于储能、需求侧响应(Demand Response, DR)和网络重构手段的中、长时间尺度配电网自律运行策略; 为合理调节储能站荷电状态, 提出改善荷电状态的区域储能站修正策略。最后, 以某区域配电网为算例进行仿真分析, 结果验证了

本文方法的有效性。

## 1 区域储能站参与配电网自律运行策略

### 1.1 自律运行策略的提出

配电网自律运行是指配电网利用自身资源, 依据上级电网预设的性能指标调节自身功率需求, 使关口功率特性满足性能要求, 实现自身与主网的协同运行。本文提出基于区域储能站的配电网自律运行策略如图 1 所示。

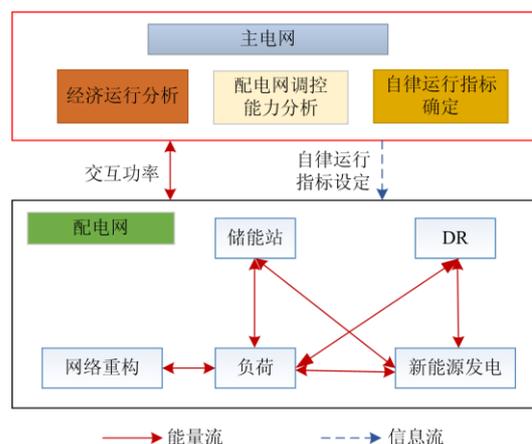


图 1 配电网自律运行模式

Fig. 1 Self-discipline operation mode of distribution network

主电网根据自身调节能力, 考虑各配电区域的扰动消纳能力、可调控空间等, 从全局优化出发合理制定自身运行计划和各配电网的端口特性指标。配电网接收主电网给定的指标参数, 挖掘网内储、荷等可调控资源, 在保障配电网自身经济安全供电的同时, 实时调节关口功率以满足指标限值。

电力系统响应功率扰动通过频率的一次、二次和三次调节来平衡。电网一次调频通过发电机的惯量和调速器实现, 主要平衡电网快速功率扰动(通常 10 s 及以下); 二次调频即自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC), 主要平衡电网 10 s 到分钟级的功率扰动; 经济调度即三次调频, 承担峰谷交替等基础性负荷波动<sup>[12-14]</sup>。本文将一次、二次和三次调频范围的功率扰动分别称为短、中和长时间尺度功率扰动。各时间尺度的边界可根据主电网的响应特性设定, 不同电网的时间尺度边界值会有差异, 应视电网的具体情况而定。短时间尺度与中时间尺度的边界主要取决于所在电网 AGC 的控制周期。AGC 控制周期短, 则更小时间尺度的功率扰动量就可以由二次调频来承担, 短时间尺度的边界值就可以较小; 反之亦然。中时间尺度与长时间尺度的边界值取决于发电调度周期, 调度周期及以上尺

度的功率波动可以通过三次调节来平衡,在中时间尺度上的 AGC 主要承担低于调度周期的扰动量。配电网区域自律需要在不同时间尺度上分别实现自律特性,以适应主电网不同调频手动的需要。

对于短时间尺度的功率扰动,由于扰动量随机性强、变化速率快、幅值较小,可由区域储能站实施本地平抑。储能站实时检测关口功率并提取短时间尺度的扰动量,根据扰动量控制储能充放电进行功率平抑。同时,区域储能站可响应电网频率变化,按设定的响应特性参与主电网一次调频。

对于 AGC 和调峰层面的中长时间尺度功率扰动,由于扰动量幅值大、变化速率慢,宜通过配电网经济调度来平衡。配网调控中心根据主电网下发的指标限值,结合配电网运行状态和扰动情况,实时调控网内源、荷资源及区域储能站,通过优化原则对功率扰动进行消纳。同时,配网调控作用可能不能完全满足关口指标,偏差量则由区域储能站进一步平衡。

### 1.2 配电网区域自律运行指标

为满足主电网不同调频手动的需要,本文按相应时间尺度给出配电网关口特性的自律指标如下:

#### (1) 短时间尺度功率扰动幅值

表征配电网关口功率短时间尺度扰动量幅值的限制指标,该指标不应超过主电网的指标要求。

#### (2) 中时间尺度功率扰动幅值

表征在 AGC 调节尺度上功率扰动量幅值限制指标。

#### (3) 中时间尺度功率爬坡率

表征在 AGC 调节尺度上功率扰动变化率限制指标,以防止功率扰动梯度过大使 AGC 机组爬坡能力不足。

#### (4) 长时间尺度功率扰动限值

配电网净负荷在长时间尺度上的功率峰谷限值。

### 1.3 自律指标的计算

首先配电网应按一定采样率实时采集关口功率。设功率序列为  $P(k)$ ,  $k=0,1,\dots,T$  为时间序列间隔;另设短时间尺度的上边界为  $T_s=k_1T$ ,中时间尺度的上边界为  $T_m=k_2T_s$ ,则短时间尺度信号的时间尺度范围为  $[T,T_s]$ ,中时间尺度信号的范围为  $[T_s,T_m]$ ,长时间尺度信号范围为  $T_1>T_m$ 。本文采用滚动平均法计算各时间尺度分量。

短时间尺度的平滑分量为  $k_1$  个关口功率采样值的算数平均。

$$\overline{P}_s(k) = [P(k) + P(k-1) + \dots + P(k-k_1+1)]/k_1 \quad (1)$$

则短时间尺度功率扰动量为

$$P_s(k) = P(k) - \overline{P}_s(k) \quad (2)$$

中时间尺度的平滑分量为  $k_2$  个短时间尺度平滑分量的算数平均。

$$\overline{P}_m(k) = [\overline{P}_s(k) + \overline{P}_s(k-1) + \dots + \overline{P}_s(k-k_2+1)]/k_2 \quad (3)$$

则中时间尺度功率扰动量为

$$\hat{P}_m(k) = \overline{P}_s(k) - \overline{P}_m(k) \quad (4)$$

中时间尺度功率爬坡率为

$$\Delta P_m(k) = P_m(k) - P_m(k-1) \quad (5)$$

长时间尺度功率扰动量为中时间尺度的平滑分量。

$$\hat{P}_1(k) = \overline{P}_m(k) \quad (6)$$

设各时间尺度功率扰动的指标限值分别为  $\delta_s$ 、 $\delta_m$  和  $\delta_1$  ( $\delta_1^+$  和  $\delta_1^-$  分别为其上下限),中时间尺度功率爬坡率限值为  $\varepsilon_m$ ,配电网自律运行指标的约束可表示为

$$\begin{cases} |\hat{P}_s(k)| < \delta_s \\ |\hat{P}_m(k)| < \delta_m \\ |\Delta P_m(k)| < \varepsilon_m \\ \delta_1^- < \hat{P}_1(k) < \delta_1^+ \end{cases} \quad (7)$$

## 2 含区域储能站的配电网自律运行策略

### 2.1 储能站短时间尺度功率扰动的平抑策略

#### 2.1.1 短时间尺度扰动量的分配

一次调频的典型响应曲线如图 2 所示,频率响应主要反映为频率的最大偏差和稳态偏差两个参数。在电网惯性一定的条件下扰动量越大则频率的最大偏差和稳态偏差越大<sup>[15-16]</sup>。首先设定电网频率最大偏差和静态偏差的允许值,并根据电网的频率响应特性确定电网的最大可承受功率扰动。最大可承受功率扰动表明各配电网向主电网排放的扰动功率不能超过此限值,超出部分应由配电网自行消纳。因此,短时间尺度功率扰动应按主电网最大可承受功率扰动来约束各个配电网的扰动总排放。设主电网最大可承受功率扰动为  $\hat{P}_{G,\max}$ ,与主电网连接的第  $j$  个配电网的容量为  $S_{D,j}$ ,主电网最大可承受功率扰动可按各配电网的容量占比进行分配,如式(8)所示。

$$\hat{P}_{D_s,j}(t) = \hat{P}_{G,\max}(t) \cdot \frac{S_{D,j}}{S_G} \quad (8)$$

式中:  $\hat{P}_{D_s,j}(t)$  为  $t$  时刻第  $j$  个配电网短时间尺度功率扰动量;  $S_G$  为主电网总容量。

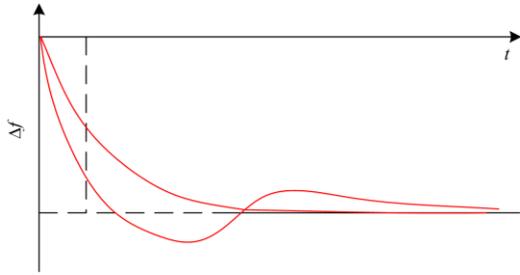


图2 电力系统一次调频的典型响应曲线

Fig. 2 A typical response curve for primary frequency modulation of a power system

### 2.1.2 储能站短时间尺度自主平抑策略

根据 1.1 节给出的配电网自律运行策略, 短时间尺度功率扰动完全由区域储能站本地自主平抑。如图 3 所示, 储能站实时检测关口功率并提取短时间尺度功率扰动量  $\hat{P}_s(k)$ , 其中正功率扰动为  $\hat{P}_s(k)^+$ , 即功率传输方向为配电网至主电网, 负功率扰动为  $\hat{P}_s(k)^-$ , 即功率传输方向为主电网至配电网。在满足储能站相关约束基础上, 根据式(7), 将  $|\hat{P}_s(k)|$  与短时间尺度功率扰动指标限值  $\delta_s$  进行比较, 若  $\hat{P}_s(k)^+ \geq \delta_s$ , 储能站充电, 充电功率为  $P_c = \hat{P}_s(k)^+ - \delta_s$ ; 若  $\hat{P}_s(k)^- \geq \delta_s$ , 储能站放电, 放电功率为  $P_d = \hat{P}_s(k)^- - \delta_s$ , 从而达到有限平抑功率扰动的效果。

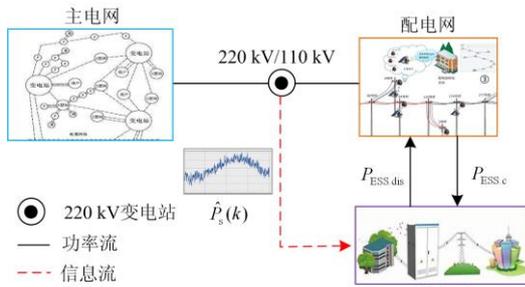


图3 储能站短时间尺度自主调节模式

Fig. 3 Short time scale self-regulation mode of energy storage station

## 2.2 中长时间尺度配电网自律运行策略

配电网中、长时间尺度的功率扰动量限值指标应通过主电网优化确定。中长时间尺度配电网自律运行策略为: 以中长时间尺度自律运行指标为判定条件, 当配电网关口功率超过指标限值时, 挖掘利用辖区储能、可控负荷及网络重构等资源进行协同自律调节。中长时间尺度功率扰动指标包括中、长时间尺度功率扰动幅值及中时间尺度功率爬坡率三项指标, 上述指标越限可单独出现亦可同时出现, 可采用同一自律运行策略进行平抑。以中时间尺度

为例, 配电台区管理系统实时检测关口功率并提取中时间尺度功率扰动量  $\hat{P}_m(k)$ 。设中时间尺度正向功率扰动为  $\hat{P}_m(k)^+$ , 即功率传输方向为配电网至主电网; 负功率扰动为  $\hat{P}_m(k)^-$ , 即功率传输方向为主电网至配电网。

考虑到储能站、DR 和网络重构的调用频率和灵活性差异, 储能站及 DR 均可作为参与配电网中长时间尺度自律运行调节手段, 重构仅作为长时间尺度自律运行调节手段。

### (1) 储能及 DR 调用级别分析

储能和 DR 作为网内两种可控资源, 调用成本存在差异, 储能单位容量调用成本  $c_{ESS}$  是固定不变的<sup>[17]</sup>, 而 DR 单位容量调用成本  $c_{DR}$  随调用功率提高而增加<sup>[18]</sup>, 两者的调用成本拟合曲线如图 4 所示。为实现配电网的经济性调用, 通过对比储能充放电及 DR 调用成本, 确定两者调用级别, 在各时段均优先调用低成本一方。如图 4 所示, 储能与 DR 调用成本存在两种情况, 需分别进行讨论。

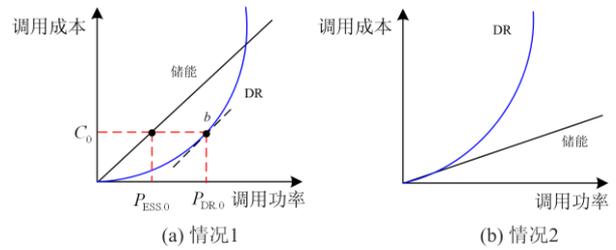


图4 储能及 DR 调用成本对比

Fig. 4 Cost comparison between stored energy and DR

情况 1: 储能和 DR 调用成本曲线存在交点, 因 DR 调用成本是随调用功率变化的, 要对比储能和 DR 的调用经济性, 需对比两者调用的边际成本。在调用功率逐渐增长过程中, 存在某一点  $b$  如图 4(a) 所示, 此处 DR 调用成本曲线的斜率与储能的相等, 即为边际成本, DR 在  $b$  点达到与储能相等的调用成本  $C_0$ , 相等调用成本下储能和 DR 的调用容量分别为  $C_0$  对应的横坐标  $P_{ESS,0}$  与  $P_{DR,0}$ 。可控资源调用时, 优先调用 DR, 当调用功率高于  $P_{DR,0}$  时, 则调用储能。

情况 2: 储能和 DR 调用成本曲线并无交点, 储能一直为调用成本较低的一方, 此情况下优先调用储能。

### (2) 储能站充放电策略

以平抑中时间尺度功率扰动为例, 阐述储能站充放电策略。根据式(7), 将  $|\hat{P}_m(k)|$  与中时间尺度功率扰动指标限值  $\delta_m$  进行比较, 当  $\hat{P}_m(k)^+ \geq \delta_m$  时, 若

$c_{ESS} \leq c_{DR}$  且  $SOC(t) < SOC_{max}$ , 优先储能站充电, 储能站充电不足以平抑扰动时再调用 DR 作为补充, 否则优先调用 DR, 以储能站为补充, 充电功率如式(9)所示; 当  $\hat{P}_m(k)^- \geq \delta_m$  时, 若  $c_{ESS} \leq c_{DR}$  且  $SOC(t) > SOC_{min}$ , 优先储能站放电, 以 DR 为补充, 否则优先调用 DR, 以储能站为补充, 放电功率如式(10)所示。

$$P_c(k) = \begin{cases} \min\{\hat{P}_m(k)^+ - \delta_m, P_{c,max}\}, & c_{ESS} \leq c_{DR} \\ \min\{\hat{P}_m(k)^+ - \delta_m - P_{DR}(k), P_{c,max}\}, & c_{ESS} > c_{DR} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_d(k) = \begin{cases} \min\{\hat{P}_m(k)^- - \delta_m, P_{d,max}\}, & c_{ESS} \leq c_{DR} \\ \min\{\hat{P}_m(k)^- - \delta_m - P_{DR}(k), P_{d,max}\}, & c_{ESS} > c_{DR} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_c(k)$  和  $P_{c,max}$  为  $k$  时段储能充电功率及上限;  $P_d(k)$  和  $P_{d,max}$  为  $k$  时段储能放电功率及上限;  $P_{DR}(k)$  为  $k$  时段 DR 调用功率。

### (3) DR 调用行为分析

以平抑中时间尺度功率扰动为例, 阐述 DR 调用行为。设可转移负荷调用功率及其最大值分别为  $P_{TL}(t)$ 、 $P_{TL,max}$ , 可中断负荷调用功率及其最大值分别为  $P_{IL}(t)$ 、 $P_{IL,max}$ 。首先, 根据储能及 DR 优先调用策略确定储能与 DR 调用顺序, 当  $\hat{P}_m(k)^+ \geq \delta_m$  时, 若  $c_{DR} \leq c_{ESS}$ , 在满足 DR 相关约束的基础上, 优先调用可转移负荷, 调用量如式(11)所示, 储能站作为补充, 否则执行 2.2 节储能站充放电策略; 当  $\hat{P}_m(k)^- \geq \delta_m$  时, 若  $c_{DR} \leq c_{ESS}$ , 在满足 DR 相关约束的基础上, 调用可中断负荷和可转移负荷, 调用容量如式(12)所示, 最大可调用功率  $P_{DR,max} = P_{IL,max} + P_{TL,max}$ 。

$$P_{DR}(k) = \begin{cases} \min\{\hat{P}_m(k)^+ - \delta_m, P_{DR,max}\}, & c_{ESS} > c_{DR} \\ \min\{\hat{P}_m(k)^+ - \delta_m - P_d(k), P_{DR,max}\}, & c_{ESS} \leq c_{DR} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{TL}(t) = \begin{cases} \min\{\hat{P}_m(k)^- - \delta_m, P_{TL,max}\}, & c_{ESS} > c_{DR} \\ \min\{\hat{P}_m(k)^- - \delta_m - P_c(t), P_{TL,max}\}, & c_{ESS} \leq c_{DR} \end{cases} \quad (12)$$

长时间尺度功率扰动和中时间尺度爬坡率的储能和 DR 调用行为亦如上述, 不再赘述。中时间尺度配电网自律运行策略流程如图 5 所示。

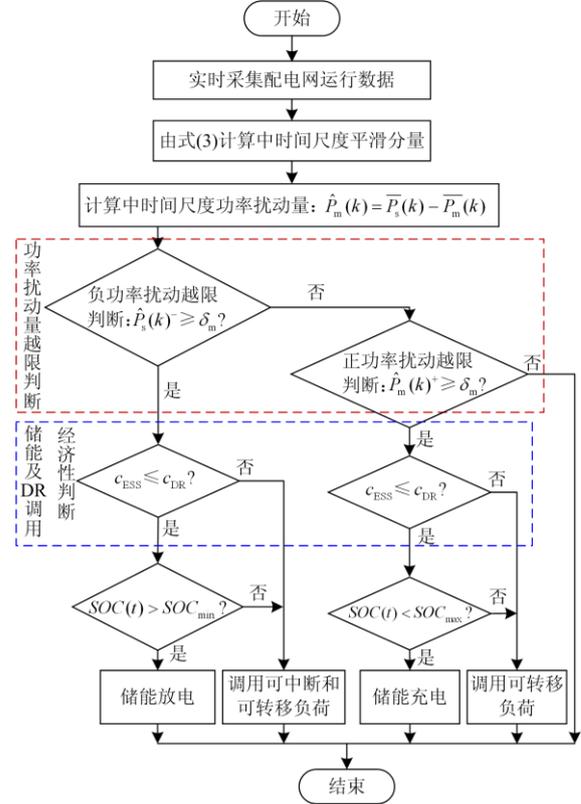


图 5 中时间尺度配电网自律运行策略流程图

Fig. 5 Flow chart of self-discipline operation strategy for medium-time-scale distribution networks

### (4) 网络重构策略

网络重构可作为参与配电网长时间尺度自律运行的调节手段, 对部分负荷供电区域进行调整。其中, 参与重构的负荷区域分为两种, 一种以常闭开关与本区域配网相连, 可断开开关将此区域负荷移出本配电网; 另一种则以常开开关与本配网相连, 可闭合开关将部分负荷接入本区域配电网<sup>[19-21]</sup>。在满足开关动作次数及状态约束的基础上, 若  $\hat{P}(k)^+ \geq \delta_1^+$ , 则进行网络重构, 闭合本区域开关, 同时断开相邻区域开关, 将部分支路负荷移入本配电网; 若  $\hat{P}(k)^- \geq \delta_1^-$ , 则进行网络重构, 断开本区域开关, 同时闭合相邻区域开关, 将部分支路负荷移出本配电网。因重构开关的固定, 网络重构调节手段每次只能调节固定功率, 不能灵活地完成调节目标, 因此需配合其他灵活调节手段对配电网进行协同自律调节。

长时间尺度功率扰动和中时间尺度爬坡率的配电网自律运行策略流程与中时间尺度功率扰动类

似, 不再赘述。

### 3 改善荷电状态的区域储能电站修正策略

上述建立的配电网与储能站自律运行策略以主电网设定的自律指标为依据, 对超出指标的扰动量平抑到限值水平为控制目标, 未超出指标的扰动则不加平抑, 是一种有限平抑策略。储能系统的合理荷电状态(State Of Charge, SOC)可提高电池运行寿命, 改善储能系统运行性能<sup>[22-23]</sup>。有限平抑策略没有考虑平抑过程对调节 SOC 状态的作用。即设置储能仅在配电网关口功率扰动超限时进行充放电行为, 将降低储能系统运行性能及使用效率。为此, 本文在配电网自律运行策略基础上, 对储能系统充放电策略进行进一步调整。具体如下:

设储能理想荷电状态为  $SOC_{per}$ ,  $t$  时刻储能实际荷电状态为  $SOC(t)$ 。若  $t$  时刻配电网区域自律运行指标  $\hat{P}_s(k)$ 、 $\hat{P}_m(k)$ 、 $\Delta P_m(k)$  和  $\hat{P}_l(k)$  均未越限, 通过判断储能  $t$  时刻实际荷电状态与理想荷电状态对储能充放电行为进行进一步调整。当  $SOC(t) > SOC_{per}$  时, 储能放电, 此时储能的放电电量为  $SOC(t) - SOC_{per}$ , 即使未超标的放电功率扰动也参与平抑; 当  $SOC(t) < SOC_{per}$  时, 储能充电, 充电电量为  $SOC_{per} - SOC(t)$ , 即使未超标的充电功率扰动储能也参与平抑, 从而改善储能的 SOC。通过上述储能充放电行为的进一步调整, 使配电网自律运行指标未超限时尽可能维持运行在理想荷电状态, 以便具备足够容量应对自律指标超限时刻。

## 4 仿真验证

### 4.1 算例说明

本文以某实际区域配电网为例进行仿真分析。区域配电网结构如图6所示。该配电网共23个节点, 电压等级10 kV, 年均最大负荷为18.79 MW, 包含工业负荷、商业负荷、民用负荷等多种负荷, 且存在空调、电采暖等多种温控负荷, 具有明显的灵活可调度性。辖区内节点1配置了容量为5.8 MWh的多站融合储能站; 节点3、9、11、14接有可中断负荷, 最大可调容量为1.2 MW; 节点6、9、17、19接有可转移负荷, 根据可转移负荷调用合同, 每日00:00—4:00和16:00—20:00分别进行可转移负荷的移入和移出, 最大可转移量为0.8 MW;  $k_1 \sim k_4$ 为网络重构开关, 其中区域  $S_1$  为可移出区域, 区域  $S_2$  为可接入区域; 该区域风力资源丰富, 节点4、7、8、12、16、18接入分布式风力发电, 总装机容量为9.5 MW。风力及负荷数据自该区域历史风力及

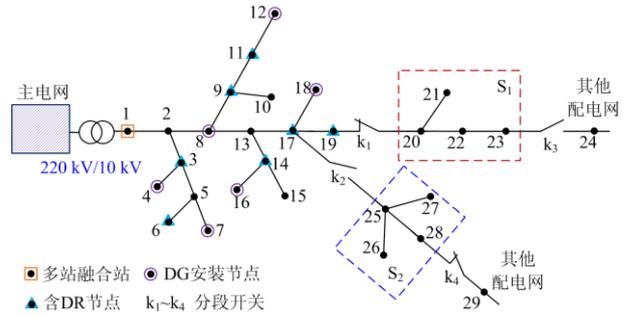


图6 配电网网络结构图

Fig. 6 Distribution network structure

负荷实际调研数据。

设系统采样间隔  $T$  为0.5 s, 短时间尺度调度周期为20 s, 调节频率为0.5 s/次, 中时间尺度调度周期为10 min, 调节频率为20 s/次, 长时间尺度调度周期为24 h, 调节频率为10 min/次。参考文献[17]构建储能和DR的调用成本函数, 由2.2节所述边际成本计算方法, 求解得出两者调用边际成本相等时对应DR调用容量约为14.87 MW。储能系统运行参数如表1所示。根据主电网运行需求及配电网实际情况, 设置短时间尺度功率扰动限值为各调度周期平均负荷的 $\pm 5\%$ , 中时间尺度功率扰动限值为各调度周期平均负荷的 $\pm 8\%$ , 中时间尺度爬坡率限值为(-2 MW, 2 MW), 长时间尺度峰谷限值为(3 MW, 8 MW), 如表2所示。

表1 储能系统运行参数

SOC 上限/MWh	SOC 下限/MWh	初始 SOC/ MWh	最大充电 功率/MW	最大放电 功率/MW	理想荷 电状态
0.29	5.51	2.90	2.00	1.50	50%

表2 自律运行指标限值

指标名称	限值
短时间尺度功率扰动	5%
中时间尺度功率扰动	8%
中时间尺度功率爬坡率	(-2 MW, 2 MW)
长时间尺度峰谷值	(3 MW, 8 MW)

### 4.2 不同时间尺度配电网关口功率仿真分析

由该地区典型日的3600个光伏与负荷功率实测数据为仿真数据, 采样间隔为0.5 s, 仿真得出该典型日18:00—18:30的30 min内的配电网关口功率数据曲线如图7所示。

由图7可知, 配电网关口功率在不同时间尺度下均存在不同程度的功率扰动。原因为, 配电网负

荷本身具有一定的波动性，同时风力发电具有强随机波动性，两者结合，造成了配电网关口功率的严重波动。

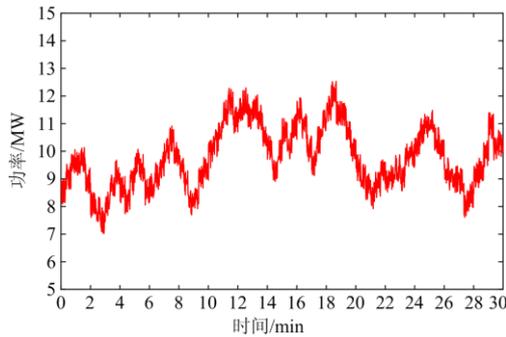


图7 配电网关口功率数据曲线

Fig. 7 Distribution network gateway power data curve

根据该典型日 24 h 并网功率采样数据，由 1.3 节自律指标计算方法，计算长时间尺度下各时段的功率扰动，得配电网关口功率越限情况如图 8 所示。

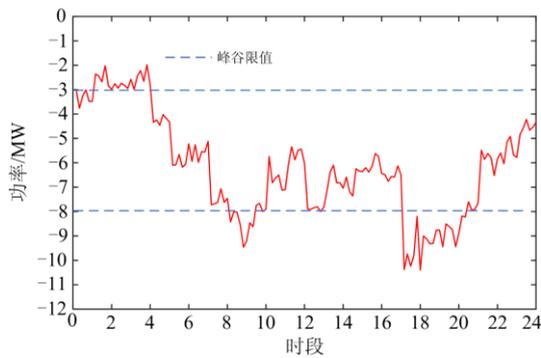


图8 长时间尺度功率峰谷值越限情况

Fig. 8 Long time scale power peak and valley value out of bounds

由图 8 可知，长时间尺度并网功率主要分布于 -8 MW 至 -3 MW，多数时段并网功率满足长时间尺度自律运行指标限值要求，各时段内存在少部分越限时段，峰值最大值为 -1.98 MW，谷值最大值为 -10.38 MW。

由 1.3 节自律指标计算方法，以图 7 所示 30 min 数据，计算中时间尺度下各时段的功率扰动、各周期扰动限值及爬坡速率大小，得配电网关口功率扰动和爬坡率越限情况，分别如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知，中时间尺度功率扰动主要分布于 -1 MW 至 1 MW，多数时段功率扰动满足中时间尺度自律运行指标要求，各周期内存在少部分越限时段，正功率扰动最大值为 1.8 MW，负功率扰动最大值为 -2.4 MW。

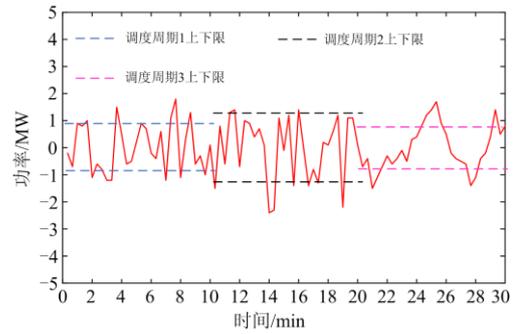


图9 中时间尺度功率扰动越限情况

Fig. 9 Medium time scale power disturbance out of bounds

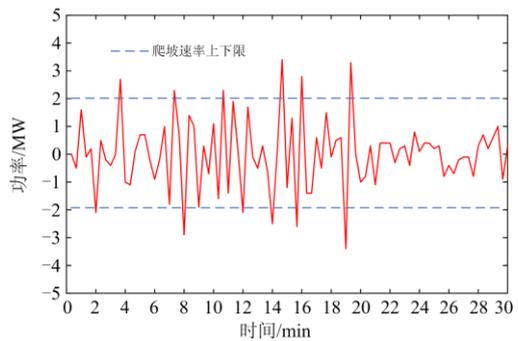


图10 中时间尺度爬坡率越限情况

Fig. 10 Medium time scale climbing rate out of bounds

由图 10 可知，中时间尺度爬坡速率主要分布于 -2 MW 至 2 MW，多数时段爬坡速率满足中时间尺度自律运行指标限值要求，各时段内存在少部分越限时段，正爬坡速率最大值为 3.4 MW，负爬坡速率最大值为 -3.6 MW。

由 1.3 节自律指标计算方法，选取图 7 所示时间范围中的第 5~6 min 数据，计算短时间尺度下各时段的功率扰动及各周期扰动限值，得配电网关口功率扰动越限情况，如图 11 所示。

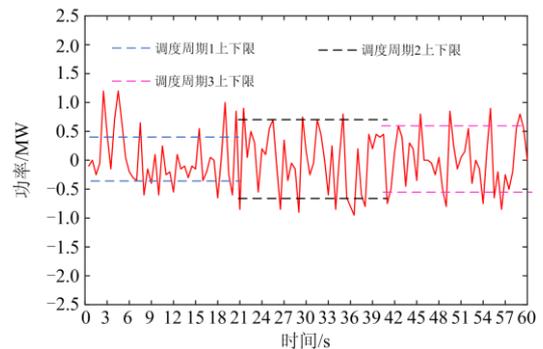


图11 短时间尺度功率扰动越限情况

Fig. 11 Short time scale power disturbance out of bounds

由图 11 可知,短时间尺度功率扰动主要分布于  $-0.5$  MW 至  $0.5$  MW, 多数时段功率扰动满足短时间尺度自律运行指标限值要求, 各时段内存在少部分越限时段, 正功率扰动最大值为  $1.2$  MW, 负功率扰动最大值为  $-0.8$  MW。

#### 4.3 不同时间尺度配电网自律调控分析

根据 2.2 节长时间尺度配电网自律运行策略, 按表 2 中设定的指标限值, 对一天 24 h, 共计 144 个时段功率峰谷值进行调节, 得到各时段储能及 DR 调控结果和重构开关状态(0 为断开, 1 为闭合)分别如图 12、图 13 所示。

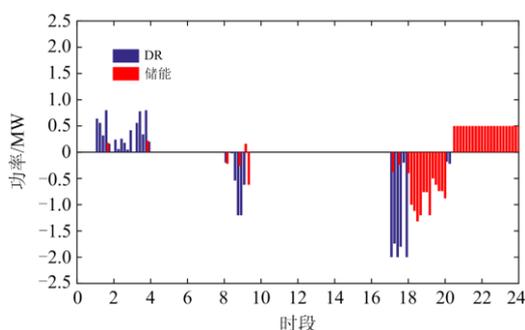


图 12 长时间尺度可控资源调控结果

Fig. 12 Results of resource control on a long time scale

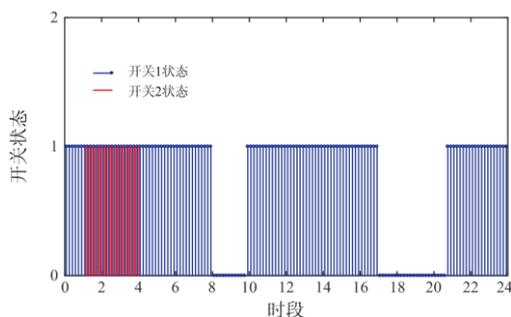


图 13 重构开关状态

Fig. 13 Reconstructed switch state

由图 12、图 13 可知,在一天中的 00:00—04:00, 功率扰动越下限, 首先通过网络重构, 闭合开关 2 接入其他区域负荷, 于此同时, 因 DR 调用成本低于储能成本, 优先调用可转移负荷, 当 DR 调用容量达到上限后调用储能平抑功率扰动。在 08:00—10:00, 功率扰动越上限, 同样首先利用网络重构断开开关 1, 从而移出该区域负荷, 同时调用可中断负荷, 当 DR 达到调用容量上限时, 利用储能放电。在 16:00—20:00, 功率扰动越上限, 断开重构开关 1 移出本区域负荷, 由于 DR 调用成本达到临界值, 故此优先调用储能放电进行调节, 储能不足时调

用可转移负荷辅助调节。在 20:00 以后, 功率扰动较小, 且储能消耗较大, 因此储能以恒定功率充电来恢复理想荷电状态。

根据 2.2 节中时间尺度配电网自律运行策略, 以表 2 中设定的指标为限值, 针对图 9 及图 10 所示越限情况利用储能和 DR 进行调节, 得到一天中 18:00—18:30, 共计 30 个时段可控资源调用结果如图 14 所示。

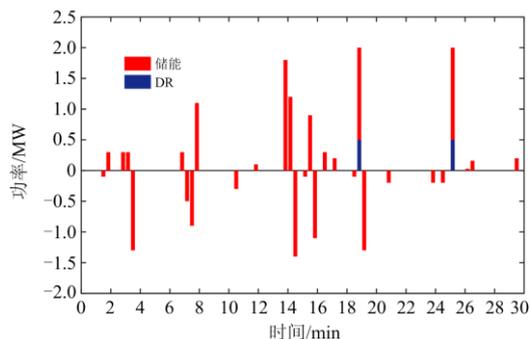


图 14 中时间尺度可控资源调控结果

Fig. 14 Results of resource control on a medium time scale

由图 14 可知, 该时段中储能为主要调控手段, DR 在两个时段参与调节。原因为, 在 18:00—18:30 时段内, DR 累计调用总量超过  $14.87$  MW, 此时储能调用成本更低, 因此优先调用储能; 同时, 由图 9 可知, 功率扰动基本处于  $-1$  MW 至  $1$  MW, 不超过储能充放电功率限值。因此, 此时段中时间尺度主要利用储能进行调节, DR 仅于较少的储能不足时段参与调节, 且在不越限时储能以恒定功率充放电来恢复理想荷电状态。

根据 2.1 节短时间尺度配电网自律运行策略, 以表 2 中设定的指标为限值, 对图 11 中越限情况利用储能进行调节, 得到 1 min 内 60 个时段储能调用结果如图 15 所示。

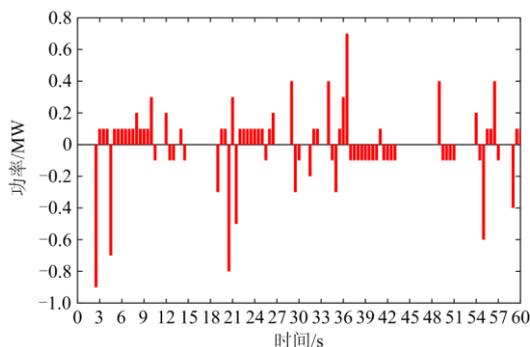


图 15 短时间尺度储能调控结果

Fig. 15 Short time scale energy storage regulation results

由图 15 可知, 短时间尺度功率扰动调节频繁, 发生功率扰动越限时仅采用储能进行调节, 在不越限时储能以恒定功率充放电来恢复理想荷电状态。

## 5 结论

本文为降低新能源发电随机不确定性导致配电网对主电网的强烈功率扰动, 提高电力系统新能源多层次有序消纳能力, 提出新能源配电网利用储能站及可控资源实施区内自律管控的输配协调消纳策略。以河北省某区域配电网为算例进行仿真分析, 得出以下结论:

(1) 提出的配电网自律运行指标能够有效并精准刻画短、中及长时间尺度下配电网关口功率扰动程度。

(2) 提出的短时间尺度储能站功率扰动平抑策略能够从秒级时间尺度通过调控储能站对配电网关口功率扰动进行平抑, 与调控前相比, 功率扰动大幅减少; 提出的中、长时间尺度配电网自律运行策略使配电网关口功率扰动从分钟及小时级时间尺度得到有效平抑, 使关口曲线趋于平稳, 峰谷差得到有效降低。

(3) 本文方法能够促进输配多层次合理分担并有序平抑大规模新能源并网带来的功率扰动, 为解决规模化新能源接入难题提供思路。

## 参考文献

- [1] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.  
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 179-186.
- [2] 郭小龙, 毕天姝, 刘方蕾, 等. 风、光高渗透率电网中考虑频率稳定的可再生能源承载力研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(1): 84-90.  
GUO Xiaolong, BI Tianshu, LIU Fanglei, et al. Estimating maximum penetration level of renewable energy based on frequency stability constrains in networks with high penetration wind and photovoltaic energy[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(1): 84-90.
- [3] 高春辉, 肖冰, 尹宏学, 等. 新能源背景下储能参与火电调峰及配置方式综述[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 38-43.  
GAO Chunhui, XIAO Bing, YIN Hongxue, et al. Energy storage participating in thermal power peaking and configuration in background of new energy: a review[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 38-43.
- [4] DRAGIČEVIĆ T, PANDŽIĆ H, ŠKRLEC D, et al. Capacity optimization of renewable energy sources and battery storage in an autonomous telecommunication facility[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 45(4): 1367-1378.
- [5] 寇凌峰, 徐毅虎, 侯小刚, 等. 一种大规模分散光伏接入配电网的集群划分方法[J]. 可再生能源, 2019, 37(4): 525-530.  
KOU Lingfeng, XU Yihu, HOU Xiaogang, et al. Cluster partition method for large scale distributed photovoltaic in distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4): 525-530.
- [6] 张颖, 寇凌峰, 季宇, 等. 计及储能与分布式电源协同的配电网分层分区优化控制[J]. 中国电力: 1-10[2020-05-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200310.1740.006.html>.  
ZHANG Ying, KOU Lingfeng, JI Yu, et al. Hierarchical and partitioned optimal control of distribution networks considering the coordination between energy storage and distributed generation systems[J]. Electric Power: 1-10[2020-05-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200310.1740.006.html>.
- [7] 杨雨瑶, 张勇军, 林国营, 等. 含光储联合发电系统的配电网双目标拓展无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 39-46.  
YANG Yuyao, ZHANG Yongjun, LIN Guoying, et al. Double-objective extended reactive power optimization in distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 39-46.
- [8] 翟鹤峰, 杨明, 赵利刚, 等. 提升分布式电源接纳能力的配电网三相鲁棒动态重构[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 35-47.  
ZHAI Hefeng, YANG Ming, ZHAO Ligang, et al. Three-phase robust dynamic reconfiguration of distribution network to improve acceptance ability of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 35-47.
- [9] 周任军, 李斌, 黄婧杰, 等. 含源荷相似度和曲线波动度约束的源荷储协调优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4092-4101.  
ZHOU Renjun, LI Bin, HUANG Jingjie, et al. Source-load-storage coordinated optimization model with source-load similarity and curve volatility constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4092-4101.
- [10] 甘伟, 郭剑波, 李相俊, 等. 面向多应用需求的分布式储能优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1504-1511.  
GAN Wei, GUO Jianbo, LI Xiangjun, et al. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements[J]. Power System Technology,

- 2019, 43(5): 1504-1511.
- [11] 薛晨, 任景, 张小东, 等. 含虚拟储能的新能源高渗透电网深度调峰备用决策模型[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 35-43.  
XUE Chen, REN Jing, ZHANG Xiaodong, et al. A reserve decision model for high-proportional renew energy integrated power grid based on deep peak-shaving and virtual storage[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 35-43.
- [12] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 44-50.  
FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 44-50.
- [13] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.
- [14] 陆秋瑜, 杨银国, 王中冠, 等. 基于次梯度投影分布式控制法的虚拟电厂经济性一次调频[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 79-85.  
LU Qiuyu, YANG Yinguo, WANG Zhongguan, et al. Economic primary frequency control of virtual power plant applying distributed control method based on sub-gradient projections[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 79-85.
- [15] 李卫国, 焦盘龙, 刘新宇, 等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 43-52.  
LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52.
- [16] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3897-3908.  
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [17] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [18] DADKHAH A, VAHIDI B, SHAFIE-KHAH M, et al. Power system flexibility improvement with a focus on demand response and wind power variability[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(6).
- [19] SALAU A O, GEBRU Y W, BITEW D. Optimal network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile enhancement in distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 6(6): 1-8.
- [20] YIN Ziyang, JI Xingquan, ZHANG Yumin, et al. Data-driven approach for real-time distribution network reconfiguration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 14(13): 2450-2463.
- [21] TULADHAR S R, SINGH J G, ONGSAKUL W, et al. Multi-objective approach for distribution network reconfiguration with optimal DG power factor using NSPSO[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 2842-2851.
- [22] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 89-97.  
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 89-97.
- [23] 刘国静, 吕风波, 赵宏大, 等. 基于  $N-1$  准则的变电站储能容量优化配置模型及方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(12): 54-59.  
LIU Guojing, LÜ Fengbo, ZHAO Hongda, et al. An optimal allocation model and method of energy storage capacity in substations based on  $N-1$  criterion[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(12): 54-59.

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-08-03

作者简介:

陈岩(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与新能源技术。E-mail: xtawangwb@126.com

(编辑 张爱琴)