

DOI: 10.7667/PSPC170330

# 基于分层储能的主动配电网需求响应 控制策略研究及实现

张旭升, 李瑞生, 黄利军, 李献伟

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 开展需求响应(Demand Response, DR)和提高分布式发电(Distributed Generation, DG)渗透率可以有效地缓解输电和发电建设要求。传统配电网的无法适应 DER 高渗透率接入, 基于价格和激励的需求响应在现有的政策和市场环境下推广应用驱动力不够。为了解决上述问题, 将配电网储能系统进行分层分级, 通过层级分权和责任授权发挥储能系统的主动性, 不同层级的储能通过自主协调进行需求响应。该方法可提高分布式电源的渗透率, 延缓配电网升级改造提升资产利用率, 满足区域配电网稳定运行、电能质量、供电可靠性等, 促进储能在电力系统中的应用。基于该研究成果研制的主动配电网需求侧管理系统已应用于国家能源应用技术研究及工程示范项目, 实践验证了策略的有效性和实用性。

**关键词:** 主动配电网; 需求响应; 储能系统; 分层控制; 分布式发电

## Research and application on demand response based on hierarchical power storage

ZHANG Xusheng, LI Ruisheng, HUANG Lijun, LI Xianwei

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Using demand response (DR) and improving the distributed energy resource (DER) are efficient ways to fulfill the requirement of the power generation and transmission construction. It is difficult for traditional distribution network to completely satisfy the DER access with high permeability. Meanwhile, the DR based on the price and incentive mechanism is lack of driving force under current policy and market environment. To solve the above problems, this paper takes the energy storage system of distribution network hierarchically, exerts the initiative of energy storage system through hierarchical decentralization and responsibility authorization, and energy storage with different hierarchies carries out demand response via autonomous coordinate control. The strategy can improve distributed generation permeability, delay the upgrading and rebuilding of the distribution network, increase the asset utilization, meet the requirement of the regional distribution network reliable operation, power quality, and power supply reliability, etc., and achieve the application of energy conservation in power system. The active power demand management system based on this research result has been applied in the national energy application technology study and engineering demonstration project, which proves the practicality and efficiency of the strategy.

**Key words:** active distribution networks; demand response; energy storage; hierarchical control; distributed generation

## 0 引言

开展需求响应和提高分布式发电渗透率可以有效地缓解输电和发电建设要求。分布式发电(Distributed Generation, DG)近年来得到了长足的发

展, 传统配电网无法适应 DG 高渗透率接入<sup>[1-2]</sup>, 在现有的电价政策和市场环境下, 基于价格和激励的需求响应的推广应用驱动力也不够。储能技术引入电力系统不仅能够解决新能源发电并网波动的影响, 而且可通过参与需求响应增加配电网的弹性, 用于提高 DG 渗透率, 以及通过开展削峰填谷提升储能经济性, 但目前储能技术的经济性还不能完全满足电力系统的需求, 需要根据功能定位合理地选

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范项目  
(NY20150302)

择接入位置及容量, 制定合理的运行控制策略, 既充分发挥储能特点, 又满足经济性要求, 促进储能在电力系统中的规模化应用。

## 1 需求响应

需求响应(Demand Response, DR)的概念是美国为了发挥电力用户维护系统可靠性和提高电网运行效率而提出的, 是指通过各种激励手段促使电力用户改变用电行为, 实现负荷的调节和转移。需求响应的实施有利于加强电力供应的合理性及可靠性, 促进电力资源的优化分配等。

需求响应是通过价格信号或激励机制使电力用户做出响应, 引起的负荷特性变化满足电力系统运行要求。需求响应使不可控的电力负荷变得部分柔性可控, 使电力负荷具有一定自适应能力, 可用于电力系统调峰移峰, 并使智能用电设备具有自动跟踪系统变化的能力, 既有助于保障电网安全, 又有利于消纳大规模清洁能源<sup>[3-4]</sup>。按照响应方式将需求响应划分为两种: 基于价格的需求响应(Price-Based Demand Response, PBDR)和基于激励的需求响应(Incentive-Based Demand Response, IBDR)。PBDR要求电力消费用户对电力价格敏感, 用户可以根据电价的变化, 相应地调整其用电需求, 包括分时电价、实时电价和尖峰电价等, 一般用于满足削峰填谷的要求。IBDR通过制定确定性的或者随时间变化的激励机制, 激励用户允许供电部门在电力短缺、接近短缺或出现短期可靠性问题等事故时中断向其供电, 并得到相应的补偿或其他时间的优惠电价等, 包括直接负荷控制、可中断负荷、紧急需求响应、需求侧竞价、容量市场和辅助服务计划等, 一般用于参与发电调度优化决策。

实施需求响应需要建立支持系统, 用以提高需求响应的灵活性和效率, 使得电网和用户的参与更加容易。如图1所示, 需求响应系统包括需求侧、响应侧的软硬件系统和设备, 需求侧主要包括电力需求响应系统主站等; 响应侧主要包括用户能量管理等系统, 以及需求响应终端、智能用电设备、分布式电源、分散式储能等设备。需求响应系统的关键是响应能力, 指响应参与者改变自身用电行为、调整用电负荷及相关设备的能力, 包括响应强度和响应时间<sup>[5]</sup>。

## 2 主动配电网

主动配电网是相对于传统配电网而言。2003年国际大电网会议(CIGRE)配电系统和分布式发电专

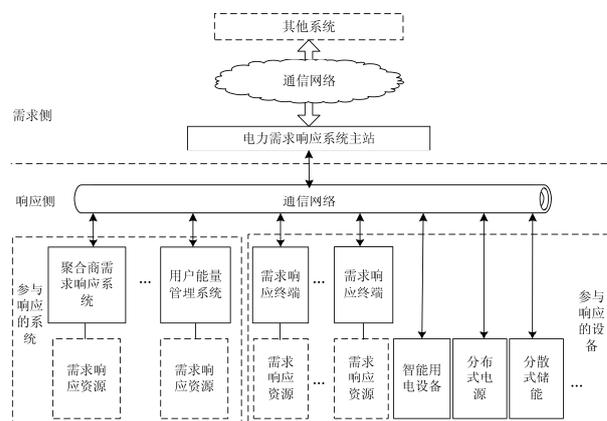


图1 电力需求响应系统组成结构图

Fig. 1 Composition of power demand response system

业委员会(C6)工作组启动项目“Development and operation of active distribution networks”, 2008年CIGRE C6重点关注配电网从单纯的被动配电网向有源配电网转变, 并提出Active Distribution Network(ADN)技术, 国内学者范明天将ADN翻译为“主动配电网”(注: 也有部分学者将其翻译为“有源配电网”), 传统配电网被称为被动配电网(Passive Distribution Network, PDN)<sup>[6]</sup>。

如图2所示, PDN的潮流是单向的, 由电力系统主网流向配网, 再流向用户; ADN的潮流是双向的, 并且可以柔性调节, ADN利用先进的信息与通信技术、大数据技术对接入配电网的DER以及柔性负荷(指可以根据需要在一定范围内进行调整的负荷)进行主动管理和控制, 通过全局优化平抑新能源功率波动, 提高配电网电能配送和优化配置能力, 保障配电网的安全经济运行情况下最大可能地利用现有资产和电网设备, 为上级电网提供电能、在线备用等服务, 从而实现配电网与客户、配电网与上级电网之间全面的互动互惠<sup>[7]</sup>。

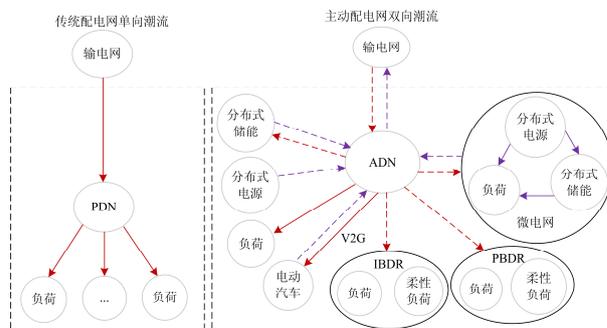


图2 PDN与ADN的潮流对比图

Fig. 2 Flow contrast of PDN and ADN

### 2.1 需求响应与主动配电网

ADN强调对可再生能源的接纳能力、提升配电

网资源的利用率和提高供电可靠性等,更多地是从供应侧出发;需求响应促使用户根据电价和互动信息等调节自身负荷需求,实现电力用户与电网企业的互动与操作,通过对需求响应实时控制,及时协调配合电网侧资源,更好地应对可再生能源并网造成的系统短时间波动,或者紧急情况的出现,保证主动配电网安全、经济、稳定运行<sup>[8-9]</sup>。

ADN 是实现高渗透率可再生能源接入、开展供需侧资源整合的有效手段,需求响应是 ADN 运行管理的有机组成部分,是实现主动控制和主动管理的重要基础,但目前的需求响应控制策略无法有效地实现需求响应控制,易造成电网功率波动,影响电网的可靠运行。

### 2.2 储能与主动配电网

储能大致可分为物理储能和化学储能,各有优缺点,在 ADN 中根据需求选择合适的储能类型。目前物理储能限于成本、效率、响应速度以及技术成熟度还处于发展阶段,本文所提的储能指通过电力电子设备接入 ADN 的化学储能<sup>[10]</sup>。

电力系统具有连续性和同时性的特点,发电—输电—用电同时完成,电源根据用电负荷变化对发电出力进行调节,保持电网电压和频率稳定。储能接入改变了电力系统“即发即用”的特性,将电力系统变得更加柔性,可有效提高电网运行的安全性、经济性和灵活性,是 ADN 不可或缺的一部分。

随着储能技术能量转换效率、能量密度、响应速度和应用成本的迅速发展,目前已在电力系统中广泛应用,包括支持新能源友好接入、削峰填谷、需求响应以及电网稳定控制等<sup>[11-13]</sup>。如图 3 所示,储能可与可再生能源发电联合运行,通过实时调整储能系统的充、放电功率,使可再生能源随机变化

的输出功率转换为相对稳定的输出;储能可参与需求响应,在用电低谷储电能,在用电高峰时释放电能,减少峰谷差,也可作为备用容量弥补线路高峰供电不足,提高电力设备的利用率及降低网损等<sup>[14]</sup>;储能参与与电网稳定控制运行,补偿分布式电源出力的间歇性,改善电能质量,提高供电可靠性和对分布式电源的消纳能力等<sup>[15]</sup>。

电网公司、发电企业和用户等都认识到储能技术在 ADN 的应用前景,但推广应用仍存在一定的困难,首先大容量储能造价仍然偏大,其次配套政策还不够清晰,然后管理机制有待完善。因此,优化储能在 ADN 中的应用方案确保储能投资与建设满足高效、经济、实用的目标,并通过示范验证引导与推动储能在 ADN 中的发展<sup>[16-17]</sup>。

## 3 基于分层储能的需求响应策略

### 3.1 基于分层储能的主动配电网

需求响应需要激励和价格补偿,储能输出可控参与需求响应有利于提高响应速度和增加响应的柔性,既有助于电网运行又有利于消纳分布式发电。

基于分层储能的主动配电网是将接入的储能系统进行分层分级,即将储能系统分布设置在不同的电网层中,制定每层储能的权责并对集中储能(即功能强大和性能卓越的储能系统)进行授权,通过层级分权和责任授权发挥储能系统的主动性,不同层级的储能系统通过自主协调进行需求响应,使其对 ADN 运行需求及时作出有效响应,有利于问题就地快速解决,防止问题扩大化,层级之间的可调控资源进行协同,结合储能和柔性负荷在不同时间尺度下的互补特性,制定基于分层储能的需求响应策略,通过就地储能优化与层级储能协同,主动全面响应运行需求,同时充分考虑储能投资和运行维护成本、需求响应的补偿、结合电价差的储放收益及节能损耗收益等,实现综合经济效益最大化。

基于分层储能的 ADN 需求响应包括四种策略:(1)同层源—储协调响应策略;(2)跨层储—储协调响应策略;(3)同层源—储—荷协调响应策略;(4)跨层源—储—荷协调响应策略。

同层源—储协调响应策略利用连接于同一层电网的分布式电源和储能系统进行需求响应,用于就地平抑分布式能源入网实时功率波动。跨层储—储协调响应策略是同层源—储协调响应策略无法满足需求响应时,利用上一层电网中被授权的储能系统解决本层反馈的问题,目的是提高分布式电源的消纳能力。

同层源—储—荷协调响应策略和跨层源—储—

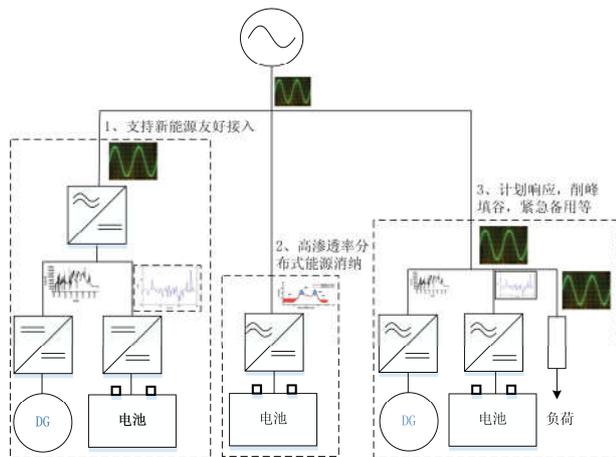


图 3 储能在 ADN 中的应用

Fig. 3 Application of energy storage in ADN

荷协调响应策略按照最大化消纳分布式发电、负荷供电以及储能经济运行的优先级进行优化控制。同层源—储—荷协调响应策略是当跨层储—荷协调响应策略无法满足需求响应时, 利用同一层电网中的分布式电源、储能系统和负荷进行协调响应; 跨层源—储—荷协调响应策略是当同层源—储—荷协调响应策略无法满足需求响应时, 利用上一层电网中的分布式电源、储能系统和负荷进行协调响应。图4为基于分层储能的ADN接线示意图, 与输电网在QF1处分界, 将储能按照接入电压等级分为10 kV和380 V交流两层, 每层中均设有分布式电源、储能系统和负荷, 当然也可根据需求设置为多层, 分布式电源以光伏发电为例, “储能”为储能系统。集中储能接入10 kV交流, 分布式储能接入380 V交

流或直流(本文暂定直流电压: 700 V), 根据电网需求、光伏出力和负荷变化, 就地优化光伏出力、层级协调提高可再生能源消纳以及需求响应联动全面满足运行需求; 通过储能与光伏就地优化减少输出波动, 通过集中储能与分布式储能进行层级协调就地消纳盈余光伏, 通过集中储能、分布式储能与柔性负荷协作进行调度计划响应、提高运行经济效益, 保证调度周期内的功率守恒及容量限制。为方便描述, 本文规定向电网输送功率为正, 消耗功率为负, 以图4中与输电网分界的开关QF1处功率为例,  $P_1$ 为正代表向电网输送功率,  $P_1$ 为负代表消耗电网功率, 其他功率正负分类相同, 下面根据电网需求对基于分层储能的需求响应策略分别进行论述。

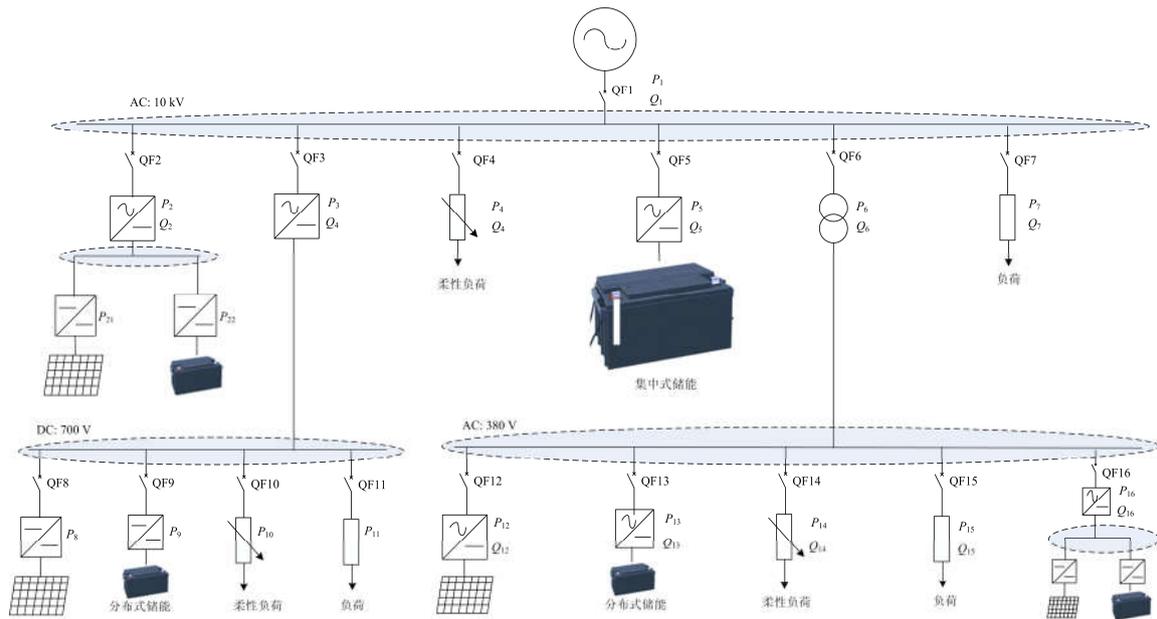


图4 基于分层储能的主动配电网接线示意图

Fig. 4 Wiring diagram of active distribution networks based on hierarchical energy storage

### 3.2 同层源—储协调响应策略

同层源—储协调响应策略(简称“源储策略”)用于将储能就地平抑分布式能源入网实时功率波动, 在同一个层进行。图5给光伏发电配置适当比例的储能形成光储有机体, 实现输出功率满足设定目标值, 与电网有功功率交换为 $P_2$ , 光伏功率输出为 $P_{21}$ , 储能扮演着电源/负荷双重角色进行实时功率调节, 即可输出功率又可吸收功率, 根据前文规定放电为正值, 充电为负值, 储能功率为 $P_{22}$ , 不考虑无功及损耗因素, 光储有机体与电网的交换功率满足式(1)。

$$P_2 = P_{21} + P_{22} \quad (1)$$

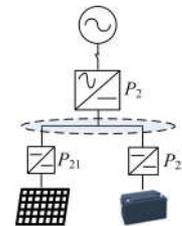


图5 储能实时平抑分布式电源功率波动接线示意图

Fig. 5 Wiring diagram of using energy storage to smooth distributed generation solar fluctuations

储能对光伏发电的作用类似于湖泊对河流的调节作用, 湖泊在洪水期蓄积河流中的部分洪水, 削

减河流洪峰,在枯水期湖泊补给河流,增加河流的径流,目的是降低光伏功率输出波动,通过就地优化减少对电网的影响。如图6所示,光储有机体根据发电预测信息制定输出功率曲线,当光储有机体输出功率大于目标功率时,储能进行充电吸收盈余功率,保证光储有机体输出功率与目标功率一致;反之,储能进行放电补充光伏输出功率不足,保证按照制定的输出功率曲线进行输出。

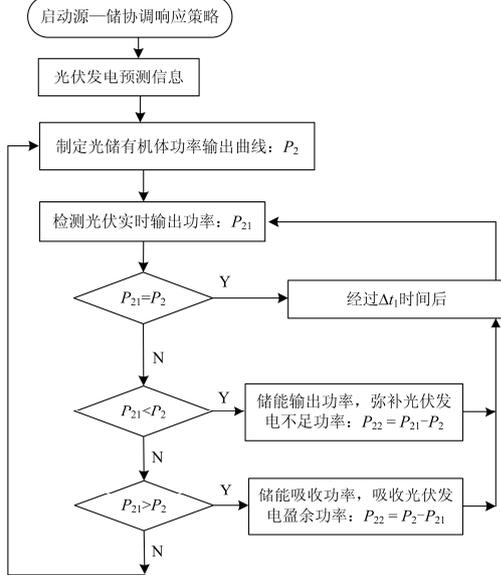


图6 储能实时平抑光伏功率波动控制流程

Fig. 6 Control flow of using energy storage to smooth distributed generation solar fluctuations real-time

### 3.3 跨层储-储协调响应策略

跨层储-储协调响应策略(简称“储储策略”)是当源储策略无法满足响应要求时,利用上一层电网中被授权的储能系统消纳本层电网中分布式发电盈余,通过两层电网中的储能系统协调满足高渗透分布式电源接入。

图7为跨层储-储接线示意图,当380V层和10kV层负荷都不能消纳分布式光伏发电,导致向上级电网输送功率即 $P_1$ 为正时,协调10kV层中被授权的集中储能消纳盈余光伏,380V层与10kV层有功交换为 $P_6$ ,无功为 $Q_6$ ,当 $P_6$ 为正时即380V层向10kV层提供功率支撑时,不考虑损耗因素,则满足式(2)和式(3)。

$$P_6 = P_{15} + P_{12} + P_{13} \quad (2)$$

$$Q_6 = Q_{15} + Q_{12} + Q_{13} \quad (3)$$

10kV层与上级电网的有功交换为 $P_1$ ,无功为 $Q_1$ ,当 $P_1$ 为正时即10kV层向上级电网输送电能时,不考虑损耗因素,则满足式(4)和式(5)。

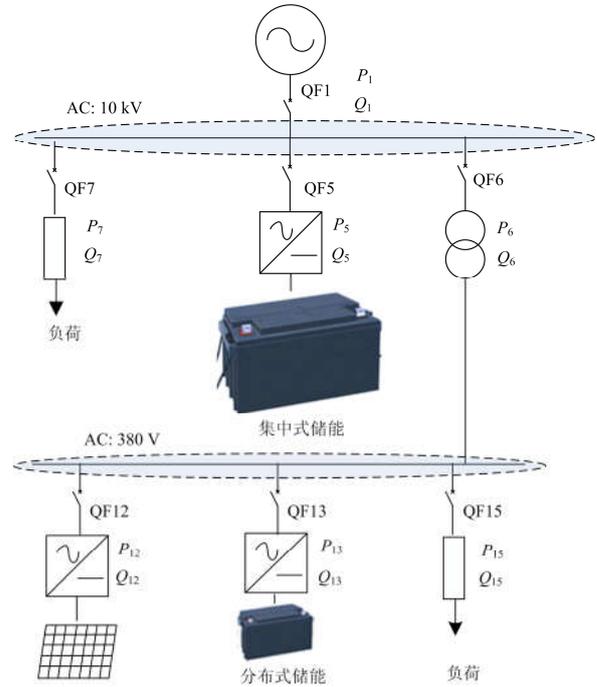


图7 跨层储-储接线示意图

Fig. 7 Wiring diagram of using energy storage to smooth distributed generation solar fluctuations

$$P_1 = P_7 + P_6 + P_5 \quad (4)$$

$$Q_1 = Q_7 + Q_6 + Q_5 \quad (5)$$

储储策略有利于提升集中储能的利用水平,同时基于就地快速响应的思想,本层问题尽可能本层解决、超出本层能力提交上级解决的思想,这是制度分权的体现,通过授予备用容量大、调节能力强的集中储能主动解决下层电网无法解决而提交问题的权利,提高分布式电源的消纳能力。如图8所示,当380V层对10kV层有功率上送时,检测10kV层对上级电网是否上送功率,若没有功率上送表示10kV层负荷自动消纳了380V层上送的功率盈余,无需协调10kV层集中储能进行响应消纳;若10kV层对上级电网输送功率,则表示380V层盈余发电将越级扩大,基于分层储能ADN就地问题就地快速响应的解决思路,通过10kV层集中储能增加充电功率或减少放电功率消纳380V层盈余发电。

启动储储策略时需要先检查上一层电网中储能系统是否具有具备参与响应的资源或能力(既被授予又具备响应能力),这个涉及策略的互斥,基于分层储能的ADN需求响应策略通过制度分权和授权对问题进行快速响应,原则上本层级的问题就地解决,超出本层级解决能力由上级协助解决,原则上下级提交的问题也是本层级问题,解决时涉及问题

优先级及资源占用, 当上一层电网储能被占或能力不够时, 需启动源—储—荷协调响应策略解决。

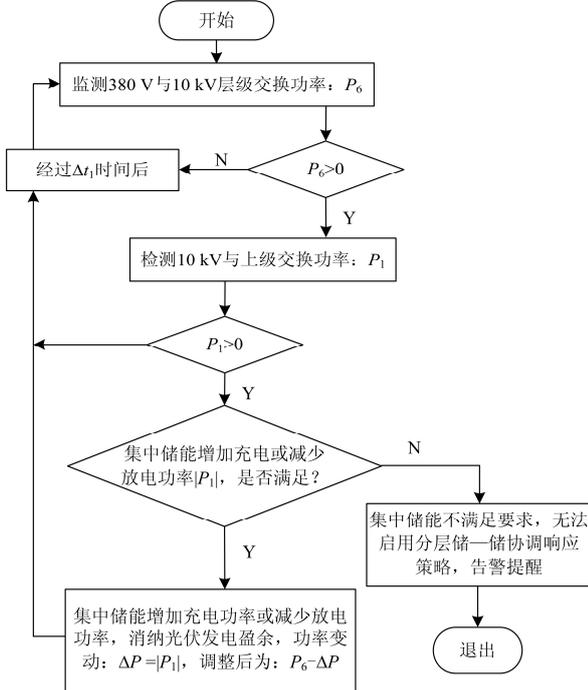


图8 分层储—储协调消纳盈余分布式发电控制流程

Fig. 8 Control flow of consuming surplus distributed generation based on hierarchical energy storage

### 3.4 源—储—荷协调响应策略

基于分层储能的ADN源—储—荷协调响应策略分为两种, 即同层源—储—荷协调响应策略(简称“同层策略”)和跨层源—储—荷协调响应策略(简称“跨层策略”), 同层策略用于储储策略无法满足需求响应时启用, 利用同一层电网中的分布式电源、储能系统和负荷进行需求响应; 跨层策略用于同层策略不能满足响应需求时启动, 即利用上一层电网中的分布式电源、储能系统和柔性负荷解决本层电网需求; 两种策略控制流程相似, 不同之处是由原来调整本层资源变成了调整上一层的资源, 即利用上一层电网资源解决本层问题, 但都需在保证ADN稳定运行的基础上, 按照最大化消纳分布式发电、负荷供电以及储能经济运行的优先级进行优化控制。

#### 1) 同层策略

同层策略基于就地快速响应的思想, 在同一层利用资源包括输出功率可限制的分布式电源、容量及功率有限的储能以及响应能力有限的负荷, 约束条件有最大化消纳分布式电源、保证负荷供电的情况下满足需求响应。同层策略不仅能用于解决储储策略无法满足的需求响应(分布式发电盈余越级倒送电问题), 而且可配合上一层电网进行需求响应,

或用于减少上送功率(增加电网功率使用), 或减少电网功率使用(增加上送功率), 配合上一层电网进行稳定控制、调度计划响应, 削峰填谷、紧急备用等。

如图9所示, 同层策略有两种应用场景, 380 V交流配网与上级电网通过变压器连接, 700 V直流配网与上级电网通过变换器连接, 变换器相对变压器更加灵活可控, 或减少上送功率(增加电网功率使用), 或减少电网功率使用(增加上送功率), 满足电网的需求响应, 配合上级电网进行稳定控制、调度计划响应, 削峰填谷、紧急备用等。

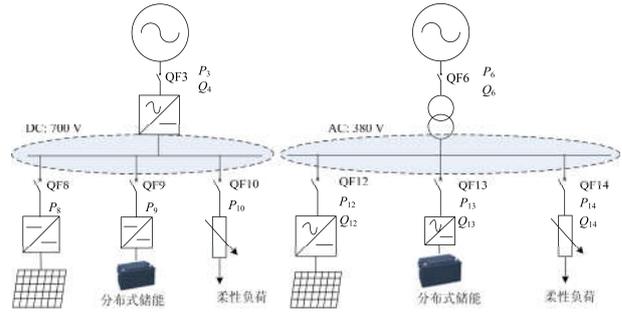


图9 同层源—储—荷接线示意图

Fig. 9 Wiring diagram of distributed generation/energy storage /controllable load in the same class

380 V交流层与上级电网的功率交换可通过对本层分布式发电、储能以及柔性负荷三者的调控进行控制, 不考虑损耗因素, 满足式(6)和式(7)。700 V直流配网层通过电力电子设备与上级电网连接, 本层没有无功控制, 与上级电网功率交换满足式(8)。

$$P_6 = P_{12} + P_{13} + P_{14} \quad (6)$$

$$Q_6 = Q_{12} + Q_{13} + Q_{15} \quad (7)$$

$$P_3 + Q_3 = P_8 + P_9 + P_{10} \quad (8)$$

利用布尔型变量DIRFlag表示限制功率方向, TRUE表示设置功率上送上限(即DIRFlag=1), FALSE表示设置功率上送目标值(即DIRFlag=0); 用数字变量P6\_GOAL表示本层与上层电网功率交换目标值, 正数表示向电网输送功率目标值, 负数表示消耗电网功率目标值。

以380 V交流配网与10 kV电网为例, 图10为同层源—储—荷协调响应控制流程, 同层策略需要先对DIRFlag和P6\_GOAL赋值, 检测380 V层与10 kV层实时功率交换P6。

若DIRFlag为TRUE即设置了功率上送上限, 380 V层向10 kV上送功率不得超过P6\_GOAL; 若P6 - P6\_GOAL < 0表示实时上送功率小于上送目标值或实时使用功率大于目标值, 无需调整, Δt1时间后循环, 反之则需要减少上送或增加使用功率

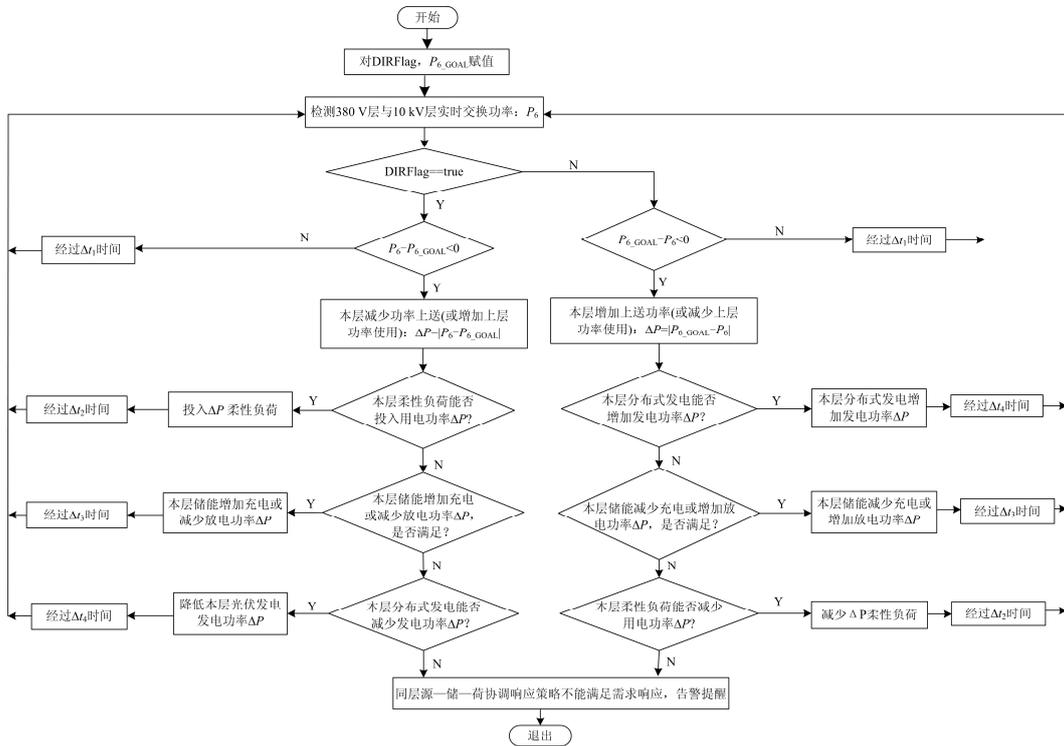


图 10 同层源—储—荷协调响应控制流程

Fig. 10 Coordinated control flow of distributed generation/energy storage /controllable load in the same class

$\Delta P (\Delta P = |P_6 - P_{6\_GOAL}|)$ ，检查本层柔性负荷能否能够投入用电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则投入 $\Delta P$ 的柔性负荷，根据柔性负荷的响应时间延迟 $\Delta t_2$ 时间后循环，否则继续检查本层储能能够增加充电或减少放电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则本层储能增加充电或减少放电功率 $\Delta P$ ，根据储能响应时间延迟 $\Delta t_3$ 时间后循环；若仍不满足要求，检查本层分布式发电能否减少发电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则降低本层光伏发电功率 $\Delta P$ ，根据光伏发电响应时间延迟 $\Delta t_4$ 时间后循环，若不满足要求则表示同层策略不能满足需求响应，进行告警并退出。

若 DIRFlag 为 FALSE 即设置了功率上送目标，380 V 层向 10 kV 上送功率目标为  $P_{6\_GOAL}$ ，通过减少本层使用功率或增加上送功率使  $P_6$  接近目标值，若  $P_{6\_GOAL} - P_6 < 0$  时，表示实时上送功率大于目标值或实时使用功率小于目标值，无需调整， $\Delta t_1$  时间后循环，反之则需要减少使用或增加上送功率  $\Delta P (\Delta P = |P_{6\_GOAL} - P_6|)$ ；检查本层分布式发电能否增加发电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则增加本层光伏发电功率 $\Delta P$ ，根据分布式发电响应时间延迟 $\Delta t_4$ 时间后循环，否则继续检查本层储能能否减少充电或增加放电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则本层储能减少充电或增加放电功率 $\Delta P$ ，根据储能响应时间延迟 $\Delta t_3$ 时间后

循环；若仍不满足要求，检查本层柔性负荷能否减少用电功率 $\Delta P$ ，若满足要求则减少 $\Delta P$ 的柔性负荷，根据柔性负荷的响应时间延迟 $\Delta t_2$ 时间后循环，若仍不满足要求则表示同层策略不能满足需求响应，告警并退出，需跨层策略解决。

2) 跨层策略

如图 11 所示为跨层源—荷—储接线示意图，跨层策略用于同层策略不能满足响应需求时启动，启用后也需在保证配电网稳定运行的基础上，按照最

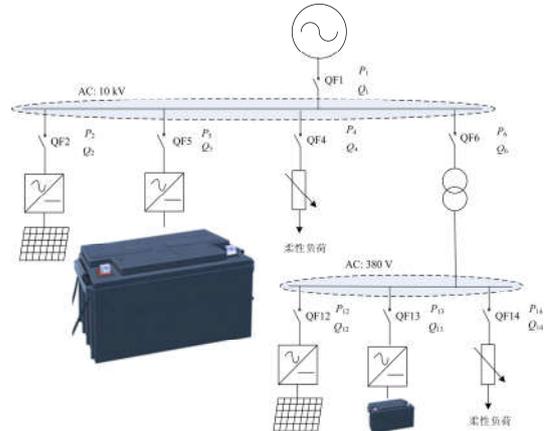


图 11 跨层源—荷—储接线示意图

Fig. 11 Wiring diagram of distributed generation/energy storage /controllable load from different classes

大化消纳分布式发电、负荷供电以及储能经济运行的优先级进行优化控制。跨层策略类似于储能策略, 通过协调上一层电网的分布式电源、储能以及柔性负荷进行响应, 控制流程与同层源—储—荷协调响应策略相似, 不同之处是由原来调整本层资源变成了调整上一层的资源, 即利用上一层电网资源解决

本层问题。

如图 12 所示为跨层源—储—荷协调响应需求控制流程所示, 与同层策略控制流程相似, 以 380 V 交流配网与 10 kV 电网为例, 同层策略也需要先对 DIRFlag 和  $P_6\_GOAL$  赋值, 检测 380 V 层与 10 kV 层实时功率交换  $P_6$ 。

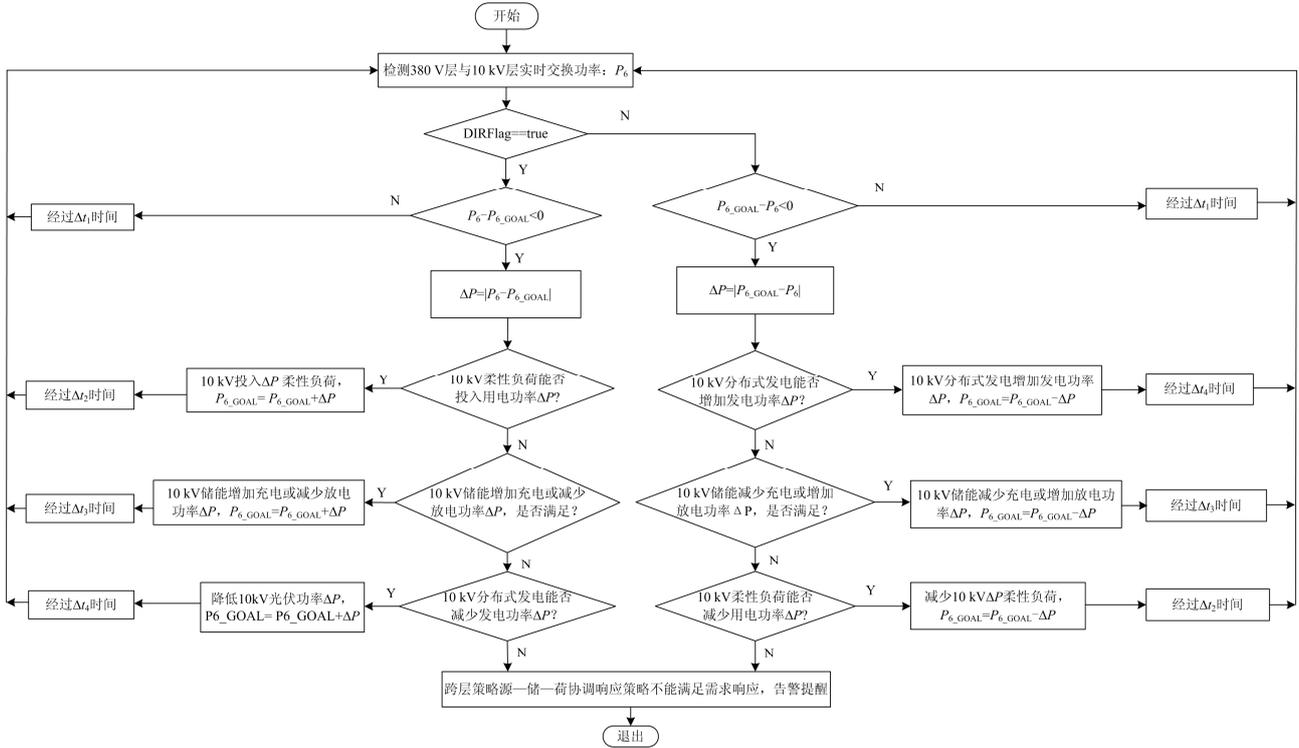


图 12 跨层源—储—荷协调响应控制流程

Fig. 12 Coordinated control flow of distributed generation/energy storage/controllable load from different classes

若 DIRFlag 为 TRUE 即设置了功率上送上限, 当  $P_6 - P_6\_GOAL < 0$  时, 表示实时上送功率小于上送目标值或实时使用功率大于目标值, 无需调整,  $\Delta t_1$  时间后循环, 反之检查 10 kV 电网层柔性负荷能否投入用电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则投入  $\Delta P$  的柔性负荷,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原来值增加  $\Delta P$ , 根据柔性负荷的响应时间延迟  $\Delta t_2$  时间后循环, 否则继续检查 10 kV 层储能能够增加充电或减少放电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则 10 kV 层储能增加充电或减少放电功率  $\Delta P$ ,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原值增加  $\Delta P$ , 根据储能响应时间延迟  $\Delta t_3$  时间后循环; 若仍不满足要求, 检查 10 kV 层分布式发电能否减少发电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则降低 10 kV 层光伏发电功率  $\Delta P$ ,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原值增加  $\Delta P$ , 根据分布式发电响应时间延迟  $\Delta t_4$  时间后循环, 若不满足要求则表示跨层策略不能满足需求响应, 告警并退出。

若 DIRFlag 为 FALSE 即设置了功率上送目标,

380 V 层向 10 kV 上送功率目标为  $P_6\_GOAL$ , 若  $P_6\_GOAL - P_6 < 0$  时, 表示实时上送功率大于目标值或实时使用功率小于目标值, 无需调整,  $\Delta t_1$  时间后循环, 反之检查 10 kV 层分布式发电能否增加发电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则增加 10 kV 层光伏发电功率  $\Delta P$ ,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原来值减少  $\Delta P$ , 根据分布式发电响应时间延迟  $\Delta t_4$  时间后循环, 否则继续检查 10 kV 层储能能否减少充电或增加放电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则 10 kV 层储能减少充电或增加放电功率  $\Delta P$ ,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原值减少  $\Delta P$ , 根据储能响应时间延迟  $\Delta t_3$  时间后循环; 若仍不满足要求, 检查 10 kV 层柔性负荷能否减少用电功率  $\Delta P$ , 若满足要求则减少  $\Delta P$  柔性负荷,  $P_6\_GOAL$  重新赋值, 为原来值减少  $\Delta P$ , 根据柔性负荷的响应时间延迟  $\Delta t_2$  时间后循环, 若仍不满足要求则表示跨层源—储—荷协调响应策略不能满足需求响应, 告警并退出。

### 4 示范应用

许继集团有限公司基于上述研究成果开发了基于分层储能的主动配电网需求侧管理系统，并应用于国家能源技术研究及工程示范工程，图 13 为系统功能界面，通过对分布式电源、多类型多层次储能设备、柔性负荷、协调控制器等设备进行监测与控制，提高了区域配网对清洁能源光伏的接纳能力，延缓了配电网升级改造，提升配电网资产利用率，满足能量管理与经济优化策略多时间尺度的控制需求。该系统从同层内部、不同层级之间协调发挥分布式储能与集中式储能作用，提升高渗透率分布式光伏接入的区域配电网运行稳定性、电能质量和供电可靠性等，适用于接入微网内部、微网之间以及与大电网的调度响应，实现新能源接入、需求响应与传统配电网有机结合，提升配电网清洁、经济和稳定运行水平。

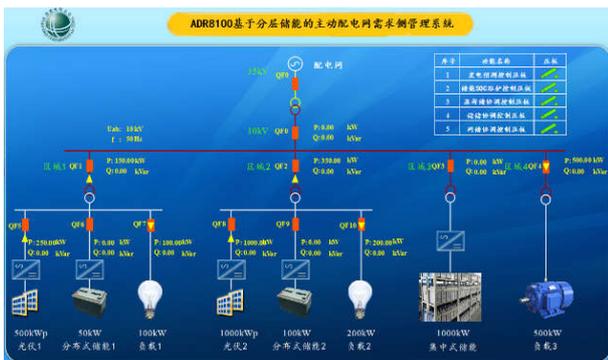


图 13 基于分层储能的主动配电网需求侧管理系统  
Fig. 13 Demand response system for active distribution networks based on hierarchical energy storage

### 5 结论

本文提出了一种基于分层储能的主动配电网需求响应控制策略，通过集中式和分布式储能系统的协调控制既满足需求响应要求又提高分布式发电渗透率，有利于延缓配电网升级改造，提升资产利用率，提高了储能系统接入配电网的运行经济性，满足区域配电网稳定运行、电能质量和供电可靠性等，实现节能环保；根据本文研究成果研制的主动配电网需求侧管理系统已应用于国家能源应用技术研究及工程示范项目，实践验证了策略的有效性和实用性。

### 参考文献

[1] 王成山, 孙充勃, 李鹏. 主动配电网优化技术研究现状及展望[J]. 电力建设, 2015, 36(15): 8-15.

WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng. Review and perspective on the optimization of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(15): 8-15.

[2] 李献伟, 李保恩, 王鹏. 微电网技术现状及未来发展分析[J]. 通信电源技术, 2015, 32(5): 202-207.

LI Xianwei, LI Baoen, WANG Peng. The technical status and development tendency of microgrid[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(5): 202-207.

[3] 中国电力企业联合会标准. 能源互联网第一部分: 总则: T/CEC 101.1—2016[S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2016.

The Standards of China Electricity Council. Internet of energy part 1: general: T/CEC 101.1—2016[S]. Beijing: China Electricity Council, 2011.

[4] 国家标准化委员会. 需求响应效果监测与综合效益评价导则: GB/T 32127—2015[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2015.

State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. Guide for monitoring effect and comprehensive benefit evaluation of demand response: GB/T 32127—2015[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2015.

[5] 国家标准化委员会. 电力需求响应系统通用技术规范: GB/T 32672—2016[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2016.

State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. General technical specification of power demand response system: GB/T 32672—2016[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2015.

[6] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3511-3521.

PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521.

[7] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.

SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.

[8] 丁明, 石雪梅. 新能源接入对主动配电网的影响[J].

- 电力建设, 2015, 36(1): 76-84.  
DING Ming, SHI Xuemei. Effect of new energy paralleling to the active distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 76-84.
- [9] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.  
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [10] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.  
HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [11] 李暉, 马瑞, 罗阳. 基于Stackelberg博弈的微网价格型需求响应及供电定价优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 88-95.  
LI Xuan, MA Rui, LUO Yang. Price-based demand response of micro-grid and optimal pricing strategy based on Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 88-95.
- [12] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.  
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [13] 朱城香, 杨俊华, 陈思哲, 等. 智能电网背景下基于人工智能理论的需求响应技术[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 63-69.  
ZHU Chengxiang, YANG Junhua, CHEN Sizhe, et al. Demand response technologies based on artificial intelligence theories in smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 63-69.
- [14] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.  
LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.
- [15] 任远, 王佳伟, 王越. 基于混合储能实时控制的峰谷平时段微电网PCC点功率调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 103-113.  
REN Yuan, WANG Jiawei, WANG Yue. Microgrid PCC power dispatch strategy based on multi-ess control during peak, flat and valley periods[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 103-113.
- [16] 陈明, 张靠社. 基于改进布谷鸟算法的风光储联合供电系统储能容量优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 141-146.  
CHEN Ming, ZHANG Kaoshe. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in wind-PV-storage power generation system based on improved cuckoo search algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 141-146.
- [17] 叶中行, 孙明远. 考虑储能效益的微网经济调度[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 19-24.  
YE Zhonghang, SUN Mingyuan. Economic dispatch for micro-grid considering energy storage benefit[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 19-24.

收稿日期: 2017-03-09; 修回日期: 2017-06-23

作者简介:

张旭升(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护等。

(编辑 姜新丽)