

基于负荷品质梯级利用的快速需求响应市场机制设计

刘敦楠¹, 王梅宝¹, 江叶峰², 熊浩², 张振华², 赵家庆³

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 国网江苏省电力公司, 江苏省 南京市 210024;

3. 国网苏州供电公司, 江苏省 苏州市 215004)

Design of Rapid Demand Response Market Mechanism Based on Load Quality Grading Utilization

LIU Dunnan¹, WANG Meibao¹, JIANG Yefeng², XIONG Hao², ZHANG Zhenhua², ZHAO Jiaqing³

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University Beijing, Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, Jiangsu Province, China;

3. State Grid Suzhou Power Supply Co., Suzhou 215004, Jiangsu Province, China)

Abstract: Participation of demand response load in power grid dispatching can promote the development of power system towards the direction of high efficiency, economy, green and low carbon. However, when there is a large power shortage such as UHV DC blocking in the power grid, in order to improve the recovery capability of the power grid in emergency situations, a higher quality and faster response load is required. Therefore, to improve the motivation of demand response and the utilization efficiency of resources, this paper defines the rapid demand response load according to the characteristics of demand response, and proposes the grading utilization method of demand side resources according to the load quality characteristics. In addition, combined with the market calling method of demand response load, this paper designs a rapid demand response market mechanism based on load quality grading utilization, and puts forward reasonable suggestions for demand response compensation fees, providing theoretical support for the rapid demand response load to participate in the market, prompting rapid demand response from policy-oriented to market-oriented shift.

Keywords: rapid demand response; market incentive; grading utilization; calling method

摘要: 需求响应负荷参与电网调度能够促使电力系统向高效、经济、绿色、低碳方向发展,但当电网出现特高压直流闭锁等大功率缺失时,为提高电网在紧急情况下的恢复能力,就需要品质更高、速率更快的响应负荷。因此,为提高需求响应的积极性与资源的利用效率,针对需求响应特点定

义了快速需求响应负荷,并根据负荷品质特性提出了需求侧资源梯级利用方法;结合需求响应负荷的市场调用方式,设计了基于负荷品质梯级利用的快速需求响应市场机制,并对需求响应补偿费用提出合理建议。为快速需求响应负荷参与市场提供理论支撑,促使快速需求响应由政策导向型向市场导向型转变。

关键词: 快速需求响应; 市场激励; 梯级利用; 调用方式

0 引言

需求响应(demand response, DR)是指在电力市场中,为保障电网安全、稳定运行,采用价格或激励措施改变用户用电行为,以达到削峰填谷目的的一种行为^[1-3]。

随着风、光等大规模可再生能源的并网运行,其随机性、波动性给电网的稳定运行带来严重影响。传统电网调节是通过发电机出力来跟踪负荷,当电网运行遭到大的冲击时,仅依靠调节发电资源无法保障电网安全稳定时,也可通过切负荷或调用需求侧资源的方式进行有效控制^[4-7]。调用需求侧资源,能够有效减少切负荷容量,降低切负荷带来的社会成本,甚至能够替代部分高成本快速调节的发电资源,使电网运行控制更经济。

国外需求响应开展较早,并且得到了政策上的大力支持,美国的直接负荷控制(DLC)项目已经开展了40多年,最常用的DLC项目就是空调、热水器等家用电器的远程控制和调节。全美国各州的可中断负

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700263)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGJS0000DKJS1700263)。

荷开展各具特色，加州的可中断负荷主要以负荷参与计划和需求削减计划两种；PJM的可中断负荷分为紧急负荷响应和经济负荷响应两种^[8]。同时，美国也实行尖峰电价、分时电价和实时电价等需求响应措施^[9]。中国需求响应启动较晚，并且主要以有序用电管理为主，部分地区实行了峰谷分时电价或可中断负荷项目。近年来，中国出台相关政策推动需求响应的发展，江苏、上海等地区已陆续开展了一些项目^[10]。

虽然上述常规需求响应得到了广泛应用，技术水平不断提高，但当电网出现功率大量缺失时，为保障稳定运行，就需要在更短的时间内调整更大的功率。紧急拉路控制是一种快速、有效的负荷控制手段，但是它会增加社会生产的成本并给居民生活带来较大影响^[11]。同时常规的需求侧资源无法保障电网在短时间内恢复稳定，这便对需求侧资源提出了更高的要求，需要开展响应速率更快、响应容量更大的需求侧资源研究。

如何调用高品质需求侧资源，如何提高其参与积极性与响应经济性，如何对高品质需求响应成本进行补偿，都是在电网运行控制中需要考虑的问题。在电力体制改革的环境中，必须发挥市场的激励作用，激发电力的商品属性，利用经济杠杆促进电力生产和电网运行过程中的经济性优化^[11-15]。以往的需求响应模式已不能满足当下形势要求，需要重新审视其作用、激励机制、评估方法等^[16-18]。通过合理有效的市场激励机制保障响应负荷的投资回报。

1 快速需求响应负荷定义

国内外大量需求响应实践的调研表明，用户侧的负荷具备快速调节和控制能力。商业和居民负荷中的电动汽车、空调、热水器等具有较高的灵活性；同时，商业和居民的用电行为受到经济因素影响，在电价信号或激励信号下能够广泛参与到电网友好互动中来。因此，目前国内外的需求响应项目基本均针对商业和居民负荷，但单个商业和居民的负荷响应能力不足，需要大规模的统一聚集。

本文将快速需求响应负荷定义为由独立运营商聚集的、具有超短期时间尺度响应能力的用户侧负荷群，旨在当电网出现大功率缺失等紧急情况时发挥负荷群响应速率、响应容量等优势，在短时间内实现电网恢复稳定运行。但快速需求响应要达到与电网友好互动，需要构建负荷群控制中心，这是一个连接负荷

群与电网的中间机构，实现信息在电网中心与负荷群之间的互动，以保障信息在超短期时间内在负荷群与电网之间双向流动。

2 需求侧资源品质梯级利用方法

2.1 需求侧资源品质梯级利用原则

不同的需求侧资源具有不同的特性，同时电网运行异常状况也具有多样性。为防止在调用需求侧资源这一过程中造成资源浪费，本文设计了需求侧资源品质梯级利用方法，针对电网不同的异常情况，采用不同品质的响应负荷来保障电网稳定运行，以达到需求侧资源“高品高用，低品低用”的目的，如图1所示。需求侧资源梯级利用一方面可以实现资源的充分利用，另一方面可有效提高用户参与电网调节积极性。

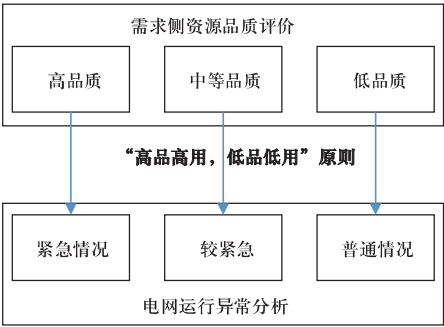


图 1 需求侧资源品质评价与梯级利用原则
Fig. 1 Grading utilization of DSM resources

2.2 需求侧资源品质梯级利用流程

2.2.1 电网运行异常等级划分

电网运行通常受到气候环境、人为破坏、设备维护、发电能力、用电量等因素的影响。根据电网运行恢复稳定的紧迫性，将电网运行异常划分为：“紧急、较紧急、普通”3个等级。

2.2.2 需求侧资源品质评价指标体系

从需求侧资源特性、电网侧效益两方面构建了需求侧资源品质评价指标体系，如表1所示。

表 1 需求侧资源品质评价指标		
Table 1 Evaluation index for DSM resources quality		
属性	评价指标	指标解释
需求侧资源特性	响应能力 X_1	需求响应负荷的响应时间、响应容量等能力
	用户经济性 X_2	参与电网调节带来的收益

续表

属性	评价指标	指标解释
需求侧资源特性	响应可靠性 X_3	按电网需求提供规定需求响应的能力
	负荷曲线优化能力 X_4	“削峰填谷”能力
电网侧效益	电网经济性 X_5	电网所需付出的成本
	电网恢复能力 X_6	需求响应提升电网稳定性能力
	节能减排能力 X_7	需求响应带来的节能减排效益

2.2.3 需求侧资源品质排序

结合需求侧资源品质评价指标体系，选取合适的评价方法，对供应商提供的需求侧资源进行评价，并按评价结果对需求侧资源品质进行排序。

2.2.4 需求侧资源梯级利用

根据电网运行异常等级及需求侧资源品质排序，结合梯级利用原则，与需求侧资源供应商签订调用合约。以便在不同情况下，调用合适的需求侧资源来快速、有效地确保电网在紧急情况下恢复稳定运行，达到“高品高用，低品低用”的需求侧资源梯级利用。

3 需求侧资源品质评价模型

3.1 基于AHP法的指标赋权

构造各因素之间的两两关系矩阵 A 。其中， a_{ij} 是指标 i 相对于指标 j 的重要程度，且满足： $a_{ij} > 0$ ， $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ， $a_{ii} = 1$ 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

结合公式(1)，运用方根法测算各指标的权重

$$h_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

指标的权重

$$\omega_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (3)$$

最后，为了尽可能的减少专家主观判断性带来的误差，需要对矩阵 A 进行一致性检验，计算判断矩阵的随机一致性比率 CR 。若 $CR < 0.1$ 时，则表明计算出的指标权重结果可以接受。

3.2 基于区间模糊数的定量分析

3.2.1 指标量化

在对需求侧资源品质进行评价时，考虑到专家的个人偏好造成的误差，将评判等级分为5个等级：优、

良、中、及格、差。并通过区间模糊数表示这5个等级的分值，如表2所示。

表2 评判等级及分值

Table 2 Judgment grade and score

序号	指标等级	区间模糊数
1	优	(0.8, 1)
2	良	(0.6, 0.8)
3	中	(0.4, 0.6)
4	及格	(0.2, 0.4)
5	差	(0, 0.2)

3.2.2 指标数值标准化

设 b_{ik} 是第 i 个指标第 k 个负荷对应的区间模糊数， $i=1, 2, \dots, n$ ； $k=1, 2, \dots, m$ ； n 为指标个数， m 为负荷个数，则有

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

设 x_{ik} 是第 i 个指标第 k 个负荷标准化后的数据，则有

$$x_{ik} = \frac{b_{ik}}{\max_{1 \leq k \leq m} b_{ik}} \quad (5)$$

设 b_1 ， b_2 分别表示区间数，则有如下计公式：

$$\frac{b_1}{b_2} = [b_1^-, b_1^+] \left[\frac{1}{b_2^+}, \frac{1}{b_2^-} \right] \quad (6)$$

$$b_1 \times b_2 = [\min X, \max X] \quad (7)$$

$$X = \{b_1^- b_2^-, b_1^- b_2^+, b_1^+ b_2^-, b_1^+ b_2^+\} \quad (8)$$

设 y_{ik} 是第 i 个指标第 k 个负荷加权值，则

$$y_{ik} = x_{ik} \times \omega_i \quad (9)$$

通过公式(9)将各指标的区间模糊数转化为加权区间模糊数，为后续基于Topsis的评价奠定基础。

3.3 基于Topsis的评价方法

3.3.1 确定指标的正负理想解

设 y_i^+ 是第 i 个指标的正理想解， y_i^- 是第 i 个指标的负理想解，则

$$y_i^+ = \max_{1 \leq k \leq m} y_{ik} \quad (10)$$

$$y_i^- = \min_{1 \leq k \leq m} y_{ik} \quad (11)$$

3.3.2 测算每个负荷到正负理想点的距离

设 d_k^+ 是第 k 个负荷到正理想点的距离， d_k^- 是第 k 个负荷到负理想点的距离，则：

$$d_k^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ik} - y_i^+)^2} \quad (12)$$

$$d_k^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ik} - y_i^-)^2} \quad (13)$$

3.3.3 测算负荷的贴近度

设 C_k 是第 k 个负荷的贴近度, 则

$$C_k = \frac{d_k^-}{d_k^+ + d_k^-} \quad (14)$$

公式(14)的含义为: 按照贴近度 C_k 的大小对负荷品质高低进行排序, 如果贴近度 C_k 越大, 则第 k 个负荷与负理想点的距离越大、同时还与正理想点的距离越小, 说明第 k 个负荷的品质越高; 反之, 品质比较低。

4 快速需求响应市场机制设计

4.1 快速需求响应负荷参与市场方式选择

通过市场的方式调用资源, 能够更好地体现资源的差异。需求侧资源的调用体系中, 针对不同需求响应类型、不同市场环境、不同发展阶段都可以选择不同的调用方式。根据国外需求侧响应计划实施、中国电力市场与辅助服务市场交易组织的经验, 通过市场激励的方式调用需求响应资源的措施大体可以分为以下4类^[11-17]: 基于电价激励的方式、签订双边合约的方式、单边市场竞价的方式、集中撮合竞价的方式。

快速需求响应负荷主要为解决事故状况下, 快速、精准地调节电网功率的问题。其需求方即为电力系统运营商, 供方主要为能够快速响应电网功率变化的频率响应负荷、电压响应负荷、直接控制负荷。适用于快速需求响应负荷的单边市场调用方式主要有两种: 一种是基于双边合约的调用方式, 该方式下由电力系统运营商与各快速需求响应负荷提供商进行双边协商, 签订服务提供合约; 另一种是基于单边市场竞价的调用方式, 该方式下由电力系统运营商组织各快速需求响应负荷提供商进行竞价投标, 根据快速响应需求进行市场出清, 确定统一市场出清价, 并由电力系统运营商与达成交易的供应商签订合同。

两种调用方式各有优势, 基于双边合约的方式更适用于前期应用阶段, 前期参与响应负荷数量较少, 用户侧监测、控制等硬件条件良莠不齐, 为保障对负荷参与快速响应的激励作用, 应对各快速响应负荷供应商制定相应的实施计划与补偿方案, 约定硬件设备的安装费用和需求响应的补偿金额。基于单边市场竞价的方式更适合中后期阶段, 此时快速需求响应所需的通信、控制等技术相对成熟, 需求侧供应商硬件设备较完善, 易于设置统一的准入标准和技术需求, 通

过市场定价的方式可以提高需求响应资源调用的经济性。本文以双边合约的调用方式为例, 设计了快速需求响应负荷的定价机制与梯级利用方法。

4.2 基于双边合约的市场机制设计

4.2.1 准入机制

结合快速需求响应负荷的定义及特点, 规定其参与市场需满足以下条件。

1) 规模要求。由独立运营商聚集的用户侧负荷群, 主要包括居民负荷群、商业负荷群及混合式负荷群等。

2) 特性要求。具有超短期时间尺度响应能力且灵活性较高。

3) 设备要求。快速需求响应供应商拥有负荷群控制中心, 且可以与电网形成良好互动。

4.2.2 价格机制

基于双边合约的定价机制主要包括设备安装费补偿和快速需求响应补偿价格两部分。

1) 设备安装费用。设备安装费是初期需求响应不可避免的成本, 在当前缺少快速需求响应市场激励政策的情况下, 参与需求响应的收入无法预知, 因此, 需求侧负荷参与的积极性也就不高。负荷参与快速需求响应需要重新安装智能插座、电压控制等设备, 带来的固定成本投入是需求响应供应商进行决策时需要考虑的重要因素。

2) 快速需求响应补偿价格。快速需求响应补偿定价需根据不同的需求响应类型, 区分需求响应的目标和需求响应的效果, 进行差别定价。定价内容为交易周期(年度或月度)内每次单位容量快速需求响应可获取的补偿, 单位为: 元/(MW·次)。定价协商时要以资源品质考核结果为标准, 制定一定的价格预期区间。根据需求响应资源品质由高到低, 定价也由高到低。

4.2.3 信用机制

快速需求响应通常是在电网遇到紧急情况时调用的资源, 一般均是类型相似、品质较高的响应负荷群。为了更好地保障电网安全、稳定运行, 需要根据负荷聚集商的历史响应行为, 对需求侧资源品质进行进一步修正, 为此提出快速需求响应信用机制。在梯级利用过程中, 根据信用机制修正需求侧资源品质排序, 信用较高的供应商, 将获得优先响应权; 相反, 则降级。以此达到快速需求响应负荷“高品高用、低品低用”目的。

供应商每次按电网要求完成响应，将获得一定的信用分值。对于新参与市场的供应商，可通过完成普通情况下的需求响应累计获取信用分值。

4.2.4 费用来源

快速需求响应负荷补偿费用来源包括：①政府补贴；②电力系统调节备用考核；③尖峰电价。政府补贴来源于通过快速需求响应减少了紧急切负荷的容量，减少的部分因大功率缺失带来的社会生产效益损失。电力系统调节备用考核费用补偿快速需求响应的原因在于调节备用有义务为电网提供快速调节，需求响应有效弥补了部分调节备用因响应不及时或其他原因缺失的调节容量。尖峰电价则是按照“谁获利谁承担”的原则，尖峰时刻的用电负荷是需求响应的获利者，通过快速需求响应服务保障了该部分用户的尖峰用电，所以需要通过尖峰电价机制对快速需求响应负荷进行补偿。

电力系统运营商应建立“资金池”，收取以上三部分费用，用于补偿快速需求响应负荷。其中，政府补贴可向政府申请，调节备用考核可延用并网发电机组考核规则，尖峰电价制定的主要目的还是通过高额尖峰电价敦促用户主动减少尖峰负荷。

5 算例分析

本文以江苏省某地为例，选取当电网因特高压直流闭锁而引起大功率缺失、夏季负荷量较高引发电力电量失衡、风光消纳引发电力电量失衡3种情况，运用4.2.2所描述的方法对商业集群负荷、居民集群负荷、普通居民或商业负荷及混合集群负荷这4种快速需求响应负荷进行梯级利用验证分析。

5.1 基于AHP法的指标赋权

构造成对比较判断矩阵。研究采用专家问卷调查的形式，邀请5位资深专家根据电网异常情况对每个指标的重要性进行两两比较打分，为避免不同专家的偏好，最后将取5位专家评分的平均分作为指标得分，得到判断矩阵 A ，如表3所示。

表 3 判断矩阵 A
Table 3 Judgment matrix A

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	1	0.24	0.40	0.30	0.25	0.63	0.27
X_2	4.2	1.0	2.63	2.00	0.63	3.03	1.79

续表

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_3	2.50	0.38	1.0	0.56	0.37	1.41	0.36
X_4	3.3	0.5	1.8	1.0	0.45	1.59	0.38
X_5	4.00	1.60	2.70	2.20	1.00	2.08	1.69
X_6	1.60	0.33	0.71	0.63	0.48	1.00	0.31
X_7	3.70	0.56	2.80	2.60	0.59	3.20	1.00

根据第3章所描述的方法，对原始数据进行规范化处理，在此基础上进行权重计算，依次为： $\omega^T=(0.314,0.065,0.168,0.124,0.060,0.194,0.075)$ 。一致性检验 $CR=0.08<0.1$ 。表明判断矩阵 A 通过了一致性检验。

5.2 基于区间模糊数的定量分析

本文选取4类型快速需求响应负荷进行定量分析。由5位专家统一对4种负荷进行打分，如表4所示。

表 4 各指标的模糊区间数
Table 4 Number of fuzzy intervals for each indicator

评价指标	L1	L2	L3	L4
响应能力 X_1	(0.8,0.1)	(0.4,0.6)	(0.6,0.8)	(0.8,1)
用户经济性 X_2	(0.4,0.6)	(0.8,1)	(0.2,0.4)	(0.6,0.8)
响应可靠性 X_3	(0.6,0.8)	(0.2,0.4)	(0.8,1)	(0.4,0.6)
负荷曲线优化能力 X_4	(0.6,0.8)	(0.8,1)	(0.2,0.4)	(0.4,0.6)
电网经济性 X_5	(0.4,0.6)	(0.8,1)	(0.8,1)	(0.6,0.8)
电网恢复能力 X_6	(0.8,1)	(0.6,0.8)	(0.4,0.6)	(0.6,0.8)
节能减排能力 X_7	(0.4,0.6)	(0.8,1)	(0.6,0.8)	(0.4,0.6)

5.3 基于Topsis的评价

通过公式（5）~（9）对上述矩阵进行标准化加权处理。再根据公式（10）、（11）寻找各个指标的正负理想解，再结合公式（12）~（14）计算各个负荷的相对贴进度，结果如表5和表6所示。

表 5 各指标的正、负理想解
Table 5 Positive and negative ideal solutions for each indicator

评价指标	正理想解	负理想解
响应能力 X_1	(0.2514,0.3929)	(0.1257,0.2357)
用户经济性 X_2	(0.0520,0.0813)	(0.0130,0.0325)
响应可靠性 X_3	(0.1343,0.2098)	(0.0335,0.0839)
负荷曲线优化能力 X_4	(0.0991,0.1548)	(0.0247,0.0619)
电网经济性 X_5	(0.0478,0.0748)	(0.0239,0.0448)
电网恢复能力 X_6	(0.1553,0.2428)	(0.0776,0.1456)
节能减排能力 X_7	(0.0597,0.0933)	(0.0298,0.0560)

表 6 评价结果
Table 6 Evaluation result

评价指标	d_k^+	d_k^-	C_k
L1	0.0156	0.0425	0.732
L2	0.0414	0.025	0.377
L3	0.0328	0.0305	0.482
L4	0.0246	0.0353	0.589

5.4 基于信用机制的品质排序修正

假设负荷L4、L2信用等级高于负荷L1、L3。为保障电网以最小风险获取最优措施，根据信用机制，对负荷L4、L2进行升级，负荷L1、L3进行降级，获得最终的负荷品质排序： $C_{L4} > C_{L1} > C_{L2} > C_{L3}$ 。

5.5 需求侧资源梯级利用

根据电网运行异常情况及负荷品质排序，结合梯级利用原则，得出需求侧资源梯级利用结果，第4种快速需求响应负荷品质最高，可有效解决大功率缺失引发的电网异常如图2所示。

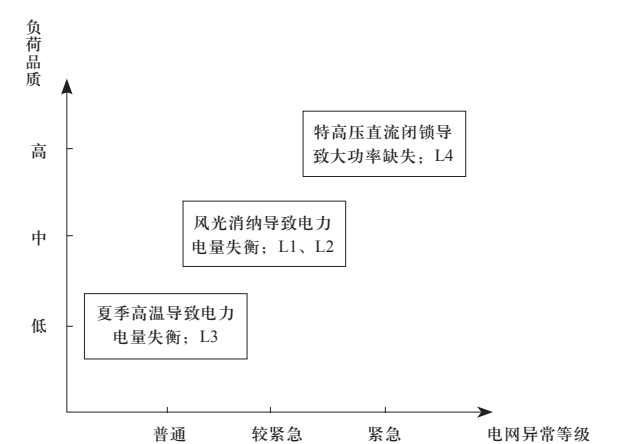


图 2 需求侧资源梯级利用结果
Fig. 2 Grading utilization results of DSM resources

6 结论

本文根据当前电网运行形势需求，定义了快速需求响应负荷，并从调用方式、价格机制、梯级利用及费用来源等方面设计了快速需求响应市场机制；通过对需求侧资源梯级利用方法的验证，可以得出以下结论：

1) 本文构建的需求侧资源梯级利用方法具有一定的科学性与实用性，可以实现对不同品质需求侧资源的高效利用。

2) 需求侧资源品质的评价工作需要大量数据的支持，由于需求侧资源自身的性质决定了部分数据的取得具有一定难度。本文采用了专家主观判断的方式对各个指标进行打分，自身存在一定的误差，正是该模型的不足之处。

3) 在市场环境下，实现对需求侧资源梯级利用，一方面有助于保障电网在紧急情况下快速、安全的恢复稳定，另一方面有利用提高用户参与市场的积极性，加快需求响应市场建设。

参考文献

[1] 赵鸿图, 朱治中, 于尔铿. 电力市场中用户基本负荷计算方法与需求响应性能评价[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 72-78.
Zhao Hongtu, Zhu Zhizhong, Yu Erkeng. Demand response performance evaluation and basic load calculation method for customers in electricity market environment[J]. Power System Technology, 2009, 33 (19): 72-78(in Chinese).

[2] 杨文轩, 何光宇, 王伟, 等. 用户侧能量管理原型系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 74-79.
Yang Wenxuan, He Guangyu, Wang Wei, et al. Design and implementation of user energy management archetype system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (20): 74-79(in Chinese).

[3] Wang J, Biviji M, Wang W M. Case studies of smart grid demand response programs in North America[C]//2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Hilton Anaheim, CA:IEEE,2011:1-5.

[4] 李卫东, 晋萃萃, 温可瑞, 等. 大功率缺失下主动频率响应控制初探[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 22-30.
Li Weidong, Jin Cuicui, Wen Kerui, et al. Active frequency response control under high-power loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42 (8): 22-30(in Chinese).

[5] 韩冰, 姚建国, 於益军, 等. 负荷主动响应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 1-6.
Han Bing, Yao Jianguo, Yu Yijun, et al. [J]. Discussion on active load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault[J]. Automation of Electric Power, 2016, 40(18): 1-6(in Chinese).

[6] 都亮, 刘俊勇, 杨可, 等. 电力市场环境下秒级可中断负荷调用策略研究[J]. 电力自动化设备, 2008(10): 19-23.
Du Liang, Liu Junyong, Yang Ke, et al. Research on second-order interruptible load invocation strategy in power market environment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008(10): 19-23(in Chinese).

[7] 王鹏, 刘敏. 需求响应技术原理及建模综述[J]. 新型工业化, 2018, 8(7): 115-118+125.

- Wang Peng, Liu Min. Review of demand response technology [J]. New Industrialization Strategy, 2018,8(7): 115-118+125(in Chinese).
- [8] 董军, 王秉晶, 冯琪, 等. 国外电力需求响应研究与实践 [J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(5): 62-64.
Dong Jun, Wang Bingjing, Feng Qi, et al. Demand response research and practice at abroad[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16 (5): 62-64(in Chinese).
- [9] 谢珍建, 于乐, 归三荣, 等. 国外需求响应技术在主动配电网中的应用[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(2): 59-60.
Xie Zhenjian, Yu le, Gui sanrong, et al. Application of foreign demand response technology in active distribution network [J]. Power Demand Side Management, 2015, 17 (2): 59-60(in Chinese).
- [10] 张志昌, 陈京生, 李彬, 等. 我国需求响应信息交换标准化现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1183-1190.
Zhang Zhichang, Chen Jingsheng, Li Bin, et al. Present situation and development tendency of standardization demand response information of exchange in China [J]. Power System Technology, 2018, 42 (4): 1183-1190(in Chinese).
- [11] Gehring-KaL. Can yesterday's demandside management lessons become tomorrow's market solution?[J].The Electricity Journal, 2002, 15(5):63-69.
- [12] 张凯, 王琨, 张少华. 基于均衡模型的需求响应资源市场化运行模式研究[J]. 中国科学 (信息科学), 2018, 48(10): 1450-1466.
Zhang Kai, Wang Hui, Zhang Shaohua. Investigating the market-based operation mechanism of DR resources using the equilibrium model [J]. Science in China(Information Sciences), 2018 (10): 1450-1466(in Chinese).
- [13] 李彬, 陈京生, 李德智, 等. 我国实施大规模需求响应的关键问题剖析与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 694-704.
Li Bin, Chen Jingsheng, Li Dezhi, et al. Analysis and prospect of key issues in in China's demand response for further large-scale implementation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):694-704(in Chinese).
- [14] 赵岩, 李博嵩, 蒋传文. 售电侧开放条件下我国需求侧资源参与电力市场的运营机制建议[J]. 电力建设, 2016, 37(3): 112-116.
Zhao Yan, Li Bosong, Jiang Chuanwen. Operation mechanism suggestions of demand-side resources in electricity market under retail power market deregulation in China [J]. Electric Power Construction, 2016, 37 (3): 112-116(in Chinese).
- [15] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9.
- Ding Yi, Hui Hongxun, Lin Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (14): 2-9(in Chinese).
- [16] 冯庆东, 何战勇. 需求响应中的直接负荷控制策略[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 59-63+76.
Feng Qingdong, He Zhanyong. Tactics of direct load control in demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49 (3): 59-63+76(in Chinese).
- [17] 周明, 李庚银, 倪以信. 电力市场下电力需求侧管理实施机制初探[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 5-11.
Zhou Ming, Li Gengyin, Ni Yixin. A preliminary research on implementation mechanism of demand side management under electricity market[J]. Power System Technology, 2005, 29 (5): 5-11(in Chinese).
- [18] Clark W G. Then and now: the perspective of the man who coined the term 'DSM' [J].Energy Policy,1996,24(4):285-288.
- [19] Rahmat A, Nosratallah M, Hadi M, et al. Power system reliability analysis with emergency demand response program[J]. International Journal of Smart Electrical Engineering, 2013,2(4):231-236.
- [20] Rahmani-Andebili M, Abdollahi A, Moghaddam M P. An investigation of im-plementing Emergency Demand Response Program (EDRP) in Unit Commitment prob-lem[C]// Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011:1-7.
- [21] 曾鸣, 王良, 李娜. 美国电力需求侧资源的应用及其启示 [J]. 华东电力, 2013, 41(7): 1416-1420.
Zeng Ming, Wang Liang, Li Na. Application of power demand side resource in america and its enlightenment to China [J]. East China Electric Power, 2013, 41 (7): 1416-1420(in Chinese).

收稿日期：2019-03-05；修回日期：2019-04-15。

作者简介：

刘敦楠 (1979), 男, 副教授, 研究方向为电力经济运行, 电力市场, 能源互联网, E-mail: liudunnan@163.com。

王梅宝 (1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, E-mail: ncepu_meibaowang@163.com。



刘敦楠

(责任编辑 张鹏)