

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201081

租赁与资产转移结合的优质供电服务模式

陈卫东, 姚知洋, 郭敏, 金庆忍, 阮诗雅

(广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘要: 优质供电服务模式是推进优质供电工程应用的重要内容。在现有可获得定制电力技术基础上, 结合用户治理需求和治理设备的治理能力, 以用户和投资者利益最大化为目标, 提出一种租赁与资产转移结合的优质供电服务模式, 包括了产权移交、放弃治理、继续租赁三种具体实施方案。提出优质供电服务方案优化模型, 包括治理设备优化配置模型和服务方案优化模型。通过实证分析三种方案下用户与投资者的成本、收益, 证明了租赁与资产转移结合模式的可行性。并进一步证明采用先租赁后资产转移的方案双方净收益最大化, 为推进优质供电服务工作提供了一种可选择的模式。

关键词: 优质供电; 服务模式; 租赁与资产转移; 双方利益最大化; 最优方案确定

Service pattern for premium power supply based on a combination of leasing and property transfer

CHEN Weidong, YAO Zhiyang, GUO Min, JIN Qingren, RUAN Shiya

(Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: The service pattern for premium power supply is an important component of promoting the application of premium power supply engineering. On the basis of existing customised power technology, this paper presents a service pattern for premium power supply based on a combination of leasing and property transfer with the goal of maximizing the interests of users and investors. It considers the needs of users and the governance capacity of governance devices. The pattern includes three specific implementation plans, i.e. property rights transfer, abandonment of governance, and continued lease. An optimization model for service patterns for premium power supply is proposed, including an optimal configuration model for governance equipment and an optimization model for service patterns. Three specific implementation schemes are proposed. Through empirical analysis of the costs and benefits of users and investors under the three scenarios, this paper proves the feasibility of the combination of lease and property transfer. It is further shown that the scheme of leasing before property transfer maximizes both parties' income, which provides an optional mode for promoting the premium power supply service.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077145) and the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd. (No. GXKJXM20190326).

Key words: premium power supply; service pattern; leasing and property transfer; maximum benefits for both parties; determination of optimal scheme

0 引言

随着新能源占比增大^[1-6], 电网内电力电子设备比例增多^[7-8]和用户侧大量使用高新技术设备^[9-11], 电网形态正发生根本性变化^[12-13], 同时, 市场化变革成为必然^[14], 给优质供电带来了新的挑战 and 机遇^[15-16]。

研究新形态下的优质供电服务模式, 具有重要理论价值和现实意义。以供电质量、优质供电为主题, 国内外开展了大量研究^[17-20], 取得了大量成果, 但优质供电服务模式的研究还处于起步阶段^[21-22]。优质供电服务可定义为: 非技术性指标和技术性指标均能满足用户需求, 给用户 提供零麻烦的供电服务。定义中, 技术性指标不仅包括已定义限制性指标, 如: 电压合格率、频率偏差、电压偏差、电压波动、谐波、三相不平衡等^[23], 还包括无明确规定, 但已

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52077145); 广西电网有限责任公司科技项目资助(GXKJXM20190326)

带来麻烦的指标,如:电压暂降、电压暂升和短时电压中断等^[24]。学术界对技术性指标开展了研究,工业界在非技术性指标上做了大量工作。技术性指标主要研究了监测、分析、评估和治理技术等^[25]。近十年来,多个研究机构对用户满意度、优质电力等开展了研究^[26]。国网、南网及各省电力公司持续改进和提升营销服务,打造综合能源服务企业,建立了较完善的非技术性服务体系。工业界与学术界紧密合作,对电压暂降、短时中断、电压暂升等开展了大量探索,在定制电力技术^[27-28]、经济影响评估^[29-30]、治理装备配置^[28,31]、治理方案选择^[32-33]等方面取得了大量成果。事实上,定制电力技术通常属于补救性措施,装置本身可以制定严格标准,但是由于不同时空条件下,不同用户对优质供电的需求差异很大,优质供电服务本质上具有非标准化特点,目前实际推进艰难的主要原因已不再是技术制约,而是较高治理成本与投资收益如何有机联系的问题。因此,基于已有定制电力技术,迫切需要深入研究具有可行性的优质供电服务模式。

优质供电服务模式,不仅需要考虑技术条件限制,重点还需考虑在现有成熟技术条件下投入产出比、成本与可能带来收益的分摊等问题。投入成本高、投资人收益不明,是制约优质供电服务的关键。因此,本文从资金、投资成本、投资风险等多角度出发,研究租赁与资产转移结合(Combination of Leasing and Property Transfer, CLPT)的优质供电服务模式,并将其与现有常见的直接购买模式进行比较研究,通过实证分析表明,租赁与资产转移相结合的模式更值得工业界推广。

1 租赁与资产转移结合的服务模式

以采用动态电压恢复器(DVR)为例,CLPT 优质供电服务模式如图 1 所示。

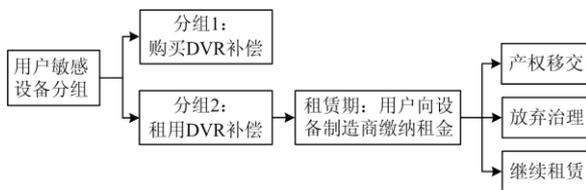


图 1 租赁与资产转移结合的优质供电服务模式流程

Fig. 1 Process of service pattern for premium power supply based on CLPT

由投资者出资提供优质供电投入,用户通过租赁方式获得优质供电服务,并与投资者签订租赁合同,租赁到期后,有三种处置方案:1) 产权移交(方案 1),用户购买已投设备;2) 放弃治理(方案 2),

用户放弃治理,投资者收回已投设备;3) 继续租赁(方案 3),用户继续进行租赁。

2 优质供电服务成本-收益量化

2.1 初始投资

初始投资包括:工程设计、设备购买、安装调试等成本^[34],其中,工程设计、安装调试费等由用户承担,设备购买成本由投资者承担。

2.2 租赁模式

主要针对治理设备采用租赁方式,分递增、递减和等额租赁几种模式。其中,等额模式适用于收益稳定场景。递增模式适用于具有领先技术、治理经验丰富的投资方参与的租赁场景中,而递减模式适用于租赁期短而收益回收快的场景。在电压暂降治理项目中,高新技术企业的收益较稳定,推荐选择等额模式。

2.3 收益量化

方案 1:首次租赁到期后,用户接受资产转移,支付转移费,获得治理设备产权。用户总成本包括:初始投入成本、租赁期所缴纳租金、转移费、转移产权后的运维成本和设备退役处置成本,各项成本折算到现值进行量化。其中,设备退役处置成本由设备成本减去折旧得到。

若用户净收益为 B_{c1} 、总收益为 P_{c1} 、总成本为 C_{c1} ,有:

$$B_{c1} = P_{c1} - C_{c1} \quad (1)$$

其中,

$$P_{c1} = \sum_{t=1}^N \frac{C_{LOSS}}{(1+r)^t} \quad (2)$$

$$C_{c1} = CI + F_S \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} + F_T + \sum_{t=n}^N \frac{C_{OP}}{(1+r)^t} + \frac{CR}{(1+r)^N} \quad (3)$$

$$CR = \alpha\{CP - D(n)\} \quad (4)$$

式中: F_S 为用户年租赁费; N 为设备寿命年; n 为租赁年; t 为年; CP 为设备成本; $D(n)$ 为设备在租赁期内的折旧; CR 为设备退役处置成本; CI 为用户初始投入成本; α 为设备折旧成本系数; F_T 为一次性支付的转移费; C_{OP} 为年运维费; C_{LOSS} 为治理后用户每年减少的经济损失。

投资方的投资成本包括设备成本、租赁期内运维成本;总收益包括租赁费和转移费。

投资方净收益 B_{m1} 为

$$B_{m1} = P_{m1} - C_{m1} \quad (5)$$

其中,

$$C_{m1} = CP + \sum_{t=1}^n \frac{C_{op}}{(1+r)^t} \quad (6)$$

$$P_{m1} = F_S \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} + F_T \quad (7)$$

式中: P_{m1} 为产权移交情况下投资者总收益; C_{m1} 为产权移交情况下投资者总成本。

方案 2: 租赁到期后, 用户放弃治理, 投资者收回治理设备, 优质供电服务结束。租赁期内, 用户成本包括初始成本、租赁期所缴纳租金、放弃治理的设备拆卸费, 用户净收益 B_{c2} 为

$$B_{c2} = P_{c2} - C_{c2} \quad (8)$$

其中,

$$P_{c2} = \sum_{t=1}^n \frac{C_{LOSS}}{(1+r)^t} \quad (9)$$

$$C_{c2} = CI + F_S \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} + CU \quad (10)$$

式中: P_{c2} 为采用方案 2 用户避免的损失, 即总收益; C_{c2} 为方案 2 的用户总成本; CU 为拆卸费。

投资者总成本包括设备成本、租赁期内设备运维成本和折旧成本; 总收益为所获得的租赁费; 投资者净收益 B_{m2} 为

$$B_{m2} = P_{m2} - C_{m2} \quad (11)$$

其中,

$$C_{m2} = CP + \sum_{t=1}^n \frac{C_{op}}{(1+r)^t} + D(n) \quad (12)$$

$$P_{m2} = F_S \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (13)$$

式中: P_{m2} 为方案 2 的投资者总收益; C_{m2} 为方案 2 的投资者总成本。

方案 3: 首次租赁到期后, 用户继续租赁服务。因无法确定第二次租赁到期后用户的选择, 故仅考虑第一租赁期内双方的收益。

用户总成本有: 初始成本和租赁期内缴纳的租赁费; 总收益与放弃治理相同, 即此总收益 P_{c3} 与方案 2 相同。因不拆卸设备, 则 C_{c3} 为

$$C_{c3} = CI + F_S \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (14)$$

此时投资方的总收益 P_{m3} 、总成本 C_{m3} 及净收益 B_{m3} 均与用户选择放弃治理情况时相同。

3 优质供电服务方案优化模型

确定 CLPT 模式后, 需进一步确定最优方案, 包括设备配置、租赁费、转移费等。

3.1 治理设备优化配置

以 DVR 为例, 补偿电压 U_{DVR} 为

$$U_{DVR} = U_n - kU_S \quad (15)$$

式中: U_n 为额定电压; U_S 为供电母线额定电压; k 为电压暂降/暂升百分比。

可根据用户设备实际需要分组, 配置治理设备。

3.1.1 待治理设备分组

DVR 容量通常为标准值, 但待治理的敏感设备容量不一定与标准容量一致。待治理设备分组后, 通过治理设备优化组合, 可实现经济治理, 分组流程如下所述所述。

1) 设有 R 台待治理设备, 补偿容量理论值为

$$S_{DVR} = \frac{U_{DVR}}{U_n} \sum_{i=1}^R S_i \quad (16)$$

式中, S_i 为第 i 台需治理设备容量。

2) 根据 S_{DVR} 和 DVR 标准容量, 将小于 S_{DVR} 且差值最小的标准容量定为目标容量 S_T 。

3) 根据目标容量, 将待治理设备分成两组。

第一组: 标准容量组。待治理设备所需治理容量接近目标容量, S_{DVR1} 与 S_T 差值最小, 配置容量为 S_T 的 DVR。

第二组: 非标准容量组。非标准容量待治理设备所需补偿容量 S_{DVR2} 较小且非标准, 配置定制容量 S_{DVR2} 的 DVR 设备。

3.1.2 治理设备最优配置模型

按目标容量 S_T 分组, 确定 DVR 配置方案。一台 DVR 容量可看成被其补偿的所有设备待补偿容量之和, 设备 i 的待补偿容量 $S_{com.i}$ 为

$$S_{com.i} = \frac{U_{DVR}}{U_n} S_i \quad (17)$$

分组可以看成“凑整”问题: 给定待治理设备及其待补偿容量 S_{com} , 从中选出组合累加待补偿容量最大且不超过 S_T 的设备: 设变量 x_i , 如果第 i 台设备选入标准容量组, $x_i=1$, 如果未选入, $x_i=0$ 。

最优分组为

$$\max \sum_{i=1}^R S_{com.i} \cdot x_i \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \max \sum_{i=1}^R S_{com.i} \cdot x_i \leq S_T \\ x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, L, R \end{cases} \quad (19)$$

3.1.3 最优配置模型求解

对求解速度无特殊要求, 希望得到准确解, 可采用动态规划法, 求解过程为: 1) 划分子问题, 确

定状态变量; 2) 定义最优解, 得状态转移方程; 3) 自底向上计算, 构造最优解。

3.2 服务方案优化

3.2.1 目标函数

所提服务模式的根本目标是第一租赁期结束后采用方案 1, 为此, 当服务方案优化模型目标函数为资产转移时, 双方净收益 B_{c1} 和 B_{m1} 最大。

$$\max B_{c1}(F_S, F_T) \quad (20)$$

$$\max B_{m1}(F_S, F_T) \quad (21)$$

3.2.2 约束条件

1) 方案 2 和 3 收益约束

虽然希望采用方案 1, 但采用方案 2 和 3 时, 双方收益也应得到保障, 才能使双方继续合作。因此, 约束条件为

$$\begin{cases} B_{c2} \geq 0 \\ B_{m2} \geq 0 \\ B_{c3} \geq 0 \\ B_{m3} \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

2) 投资者意愿约束

保证投资者投资愿意, 需满足净收益高于直接出售模式的净收益, 因此, 有约束条件式(23)。

$$B_{m1} \geq P_{sell} \quad (23)$$

式中, P_{sell} 为直接出售模式时的净收益。

3) 用户现金流约束

净现金流量约束为

$$C_{OP} < F_S < C_{LOSS} \quad (24)$$

4) 转移费约束

考虑租赁期治理设备老化, 转移费 F_T 远小于售价, 取其低于 P_{sell} , 且转移费 F_T 应比设备退役处置成本 CR 高。因此, 转移费约束为

$$CR < F_T < P_{sell} \quad (25)$$

3.2.3 服务方案优化求解

服务方案优化模型为多目标带不等式约束的优化问题, 变量数为 2。多目标优化问题的最优解为一个包含多个解的最优解集, 解集内的解之间无法互相比较优劣, 称为非劣解。这个最优解集就叫做 Pareto 最优解集, 对解集内的每个解, 在搜索区域内都不存在另一个解使得所有目标函数取值更优。

此模型可采用 NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) 算法求解^[35]。此算法是求解结果满意度最高的一种改进衍生遗传算法, 其搜索起点是一串解集而非单一解, 搜索效率得到大幅提升, 同时具有随机性、多解性等特性。运用此方法求解服务方案模型十分高效。

使用 NSGA-II 算法求解费用优化问题的简化流程图如图 2 所示。

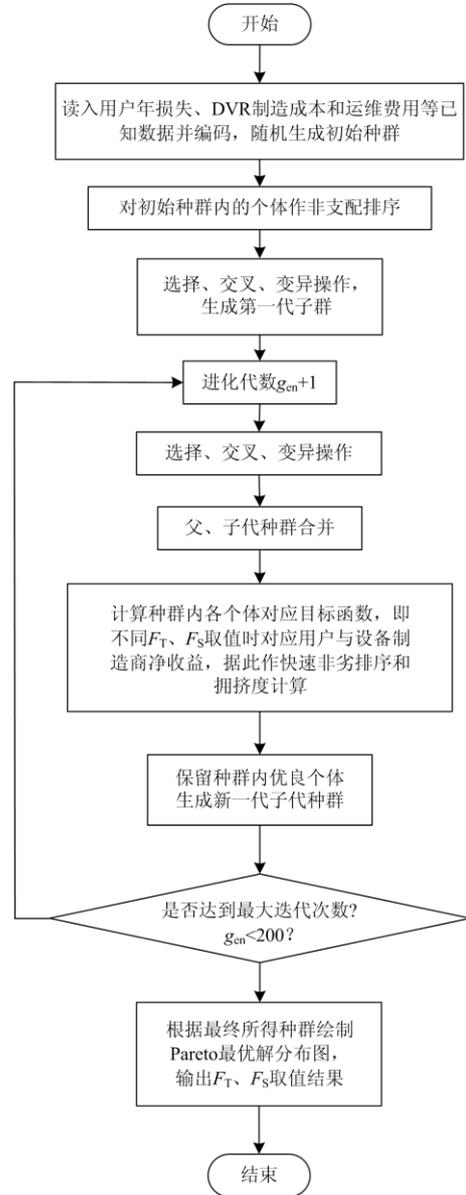


图 2 求解费用优化问题流程

Fig. 2 Process of solving cost optimization problems

4 实证分析

以某敏感用户与某 DVR 设备商合作为例, 进行实证分析。

4.1 治理设备配置

首先根据实测法, 通过分析实际记录到的历史运行数据对该敏感用户的电能质量现状进行评估, 获得不同幅值和持续时间的电压暂降概率分布, 然后结合依据式(15)所计算出的结果确定 DVR 需要输出的补偿电压 U_{DVR} , 为 50% 负载额定电压值。已

知用户待治理设备容量和额定电压, 计算每台设备待补偿容量 S_{com} , 计算结果如表 1 所示。

表 1 用户敏感设备待补偿容量

Table 1 Capacity to be compensated for user sensitive devices

设备编号	额定容量/kVA	待补偿容量/kVA
1	4	2
2	18	9
3	6	3
4	66	33
5	30	15
6	5.6	2.8
7	20	10
8	20	10
9	6	3
10	10	5
11	20	10
12	50	25
13	40	20
14	40	20
15	20	10
16	15	7.5
17	30	15
18	10	5
19	5	2.5
20	20	10

累加得到总补偿容量, 结果为 217.8 kVA。不同标准容量 DVR 及其成本如表 2。

表 2 DVR 标准容量及生产成本

Table 2 DVR standard capacity and production cost

标准容量/kVA	50	80	100	150	200	300
生产成本/万元	8	10.5	35	40	50	55.2

按分组标准, 选择 200 kVA 作目标容量 S_T 。用动态规划法求得的结果如表 3。

表 3 敏感设备分组结果

Table 3 Sensitive device grouping results

分组	配置情况		
	敏感设备 编号	待补偿容量 总值/kVA	所配置的 DVR 容量/kVA
标准容量组	1-4,7-20	200	200
非标准容量组	5,6	17.8	17.8

根据结果确定 DVR 配置方案。共需两台 DVR 进行补偿, 一台容量为 200 kVA 的 DVR 用于补偿标准容量组, 采用租赁与资产转移服务模式; 另一台容量为 17.8 kVA 的 DVR 用于补偿非标准容量组, 用户直接购买。

4.2 经济性分析

根据表 1, 假设年运维成本为设备成本的 10%,

安装、运输、调试费为用户初始成本, 如表 4。一台 200 kVA 的 DVR 市场售价约为 56 万元。

表 4 DVR 寿命年数及部分费用

Table 4 DVR life years and partial costs

寿命年数 N /年	年运维	用户初始投入	拆卸费用/万元
	成本/万元	成本/万元	
20	5	5	0.5

计算治理后减少的损失, 本例结果为 20 万元。投资方和用户方根据自身发展规划、运营情况商定租赁期 $n=5$ 年, 依据 DVR 折旧模型得租赁期内 DVR 折旧成本为 5 万元, 利率取 5%, α 取为 10%。

求解优化模型, 得 Pareto 最优解, 如图 3。依据 Pareto 最优解, 双方需要结合自身实际, 谈判协商决定最终租赁费用和产权转移费用。

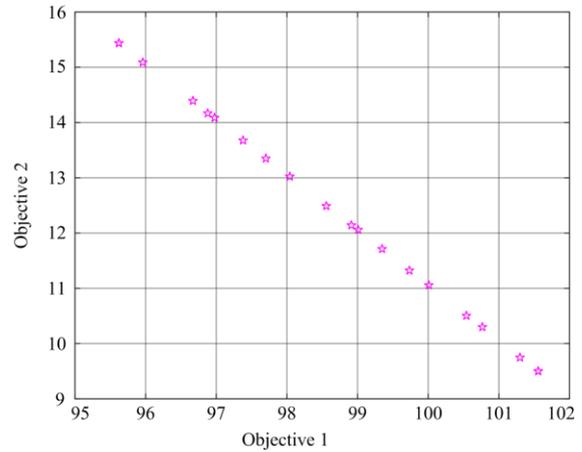


图 3 最优解集个体分布

Fig. 3 Optimal solution set individual distribution

选取其中 10 个作为最优解样本, 分析第一租赁期后采用方案 1 时双方的净收益, 结果如表 5。

表 5 选择方案 1 时双方净收益的最优解样本

Table 5 Optimal solution samples of the net income of both parties under choosing Scheme 1

最优解 序号	年租金 F_s /万元	转移费用 F_T /万元	用户净 收益/万元	投资方净 收益/万元
1	18.054 3	4.810 6	99.726 3	11.329 2
2	18.685 0	5.840 3	95.965 7	15.089 8
3	17.940 7	5.685 0	99.343 8	11.711 7
4	18.307 7	5.740 3	97.699 3	13.356 2
5	18.200 6	5.870 0	98.033 6	13.021 9
6	18.543 5	5.042 5	97.376 2	13.679 3
7	18.689 3	5.117 7	96.669 8	14.385 7
8	17.912 1	4.609 3	100.543 0	10.512 5
9	18.703 5	4.750 0	96.976 1	14.079 4
10	17.868 5	4.578 9	100.762 5	10.293 0

在分析第一租赁期后采用方案2和3的净收益,结果如表6。

表6 选择方案2/方案3时双方净收益的最优解样本

Table 6 Optimal solution samples of the net income of both parties under choosing Scheme 2/ Scheme 3

最优解 序号	方案2		方案3	
	用户净 收益/万元	投资方净 收益/万元	用户净 收益/万元	投资方净 收益/万元
1	2.923 6	1.518 5	3.423 6	1.518 5
2	0.192 6	4.249 5	0.692 6	4.249 5
3	3.415 4	1.026 7	3.915 4	1.026 7
4	1.826 2	2.615 9	2.326 2	2.615 9
5	2.290 2	2.151 9	2.790 2	2.151 9
6	0.805 3	3.636 8	1.305 3	3.636 8
7	0.174 1	4.268 0	0.674 1	4.268 0
8	3.539 0	0.903 1	4.039 0	0.903 1
9	0.112 7	4.329 4	0.612 7	4.329 4
10	3.728 0	0.714 1	4.228 0	0.714 1

三种方案比较可知:

1) 第一租赁期后,采用方案1,双方净收益均为正且较大,投资者净收益高于直接售卖净收益。

2) 采用方案2和3时,双方净收益仍然均为正,无亏损,收益有保障。

将本文方法与传统租金计算模式中的等额年金法相比较,等额年金法在相同利率、年限下,年租金为11.55万元,用户净收益小于方案1净收益,且投资方净收益只比直接售卖净收益高1.75万元。可见本文模型灵活且能保证了两方收益最大化。

因此可知,采用本文所提出的租用服务+产权移交模式开展优质供电项目,并且通过本文所研究的优质供电服务方案优化模型,可以确保无论用户租赁期结束后作出何种选择,用户和投资方都能获得正的净收益,不会有亏损,且用户选择方案1时双方净收益最大。实证分析证明了所提方法的有效性和实用性。

5 结论

1) 租赁与资产转移是优质供电服务可选模式之一,采用先租赁后资产转移的方式,不仅能有效地避免双方风险,且双方净收益均可最大化;

2) 在确定最优治理设备配置方案时,采用“凑整”原则确定被治理设备分组,最大程度上发挥治理设备的作用,有利于降低治理成本;

3) 对可选三种方案进行实证对比分析可见,三种方案均具有可行性,但采用先租赁后资产转移的方式,对用户和投资方均具有更高的收益。

实际工程具有复杂性和不确定性,本文方法推广应用时,还需结合实际确定治理目标要求和治理设备的最优配置,并考虑到空间场地约束和成本等问题。

参考文献

[1] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.

[2] 李利娟,吴军,刘红良,等.计及新能源影响静态结合的电网脆弱节点辨识[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):64-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 64-72.

[3] 刘岩,吴以岷,徐荣敏,等.含智能负荷和分布式能源接入的配电网调度研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(20):116-123.
LIU Yan, WU Yimin, XU Rongmin, et al. Research on distribution network scheduling with smart load and distributed energy access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 116-123.

[4] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.

[5] 刘增训,游沛羽,周勤勇.适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J].电力工程技术,2020,39(5):59-70.
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.

[6] 张柏林,郁娇山,黄万龙,等.甘肃地区高比例新能源大外送电网面临的挑战及思考[J].电网与清洁能源,2020,36(4):81-89,96.
ZHANG Bolin, YU Jiaoshan, HUANG Wanlong, et al. Challenges and reflections on the power grid of high proportion of new energy in gansu province[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 81-89, 96.

[7] 杨博闻,占颖,谢小荣,等.双馈风电场接入串补输电

- 系统引发次同步谐振的研究模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 120-126.
- YANG Bowen, ZHAN Ying, XIE Xiaorong, et al. A study model for subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 120-126.
- [8] 苗宇, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 面向中压配电网的电力电子变压器控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 129-134.
- MIAO Yu, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Research on power electronic transformer control strategy for medium voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 129-134.
- [9] 刘颖英, 王同勋, 唐松浩. 典型敏感设备电压暂降耐受特性测试方法[J]. 供用电, 2018, 35(2): 10-17.
- LIU Yingying, WANG Tongxun, TANG Songhao. Test method for voltage sags tolerance characteristics of typical sensitive equipment[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(2): 10-17.
- [10] XU Y H, WU Y P, ZHANG M M, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 2-10.
- [11] 常彦彦, 刘洋, 孟乐, 等. 一起储能设备投入引起直流配电网保护误动事件的分析[J]. 供用电, 2019, 36(10): 47-51.
- CHANG Yanyan, LIU Yang, MENG Le, et al. Analysis of the DC distribution protection mis-operation caused by the energy storage device input[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10): 47-51.
- [12] TABARES A, FRSNCO J F, LAVORATO M, et al. Multistage long-term expansion planning of electrical distribution systems considering multiple alternatives[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1900-1914.
- [13] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21.
- WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21.
- [14] 马莉, 黄李明, 薛松, 等. 中国新一轮电力市场改革试点有序运行关键问题[J]. 中国电力, 2017, 50(4): 17-22.
- MA Li, HUANG Liming, XUE Song, et al. Key issues for orderly operation of China's new electricity market reform pilot[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 17-22.
- [15] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
- ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [16] MANSHADI S D, KHODAYAR M E. A hierarchical electricity market structure for the smart grid paradigm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1866-1875.
- [17] FARHOODNEA M, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. Power quality improvement using an enhanced premium power park configuration[C] // IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), June 6-7, 2012, Melaka, Malaysia: 129-134.
- [18] 郑颖, 刘旭娜, 刘阳, 等. 基于过程免疫时间和可接受后果状态的优质园区供电质量等级划分[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 211-216.
- ZHENG Ying, LIU Xuna, LIU Yang, et al. Classification of power supply quality levels for premium power park based on process immunity time and acceptable resulting status[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 211-216.
- [19] 陈韵竹, 刘阳, 黄聃喆, 等. 电压暂降损失风险规避机制与保险方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 97-105.
- CHEN Yunzhu, LIU Yang, HUANG Danzhe, et al. Study on risk aversion mechanism and insurance scheme of voltage sag loss[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 97-105.
- [20] 阎怀东, 周宇, 张文华, 等. 基于贝叶斯决策树的供电服务质量分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 79-83.
- YAN Huaidong, ZHOU Yu, ZHANG Wenhua, et al. Quality analysis of power supply service based on bayesian improved decision tree[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 79-83.
- [21] XIAN X Y, CHEN Y Z, WANG Y, et al. Multi-attribute analysis on voltage sag insurance mechanisms and their feasibility for sensitive customers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(16): 3892-3899.
- [22] 肖先勇, 马愿谦, 莫文雄, 等. 售电侧放开背景下电网公司优质电力增值服务模式[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 4-10.
- XIAO Xianyong, MA Yuanqian, MO Wenxiong, et al. Premium power based value-added service model for power supply company under the opening electricity retail side[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 4-10.
- [23] BOLLEN MATH H J, 肖先勇. 理解电能质量问题: 电压暂降与短时中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[24] 徐永海, 陶顺, 肖湘宁. 电网中电压暂降和短时间中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[25] LIAO Huilian, ABDELRAHMAN S, GUO Yue, et al. Identification of weak areas of network based on exposure to voltage sags—part II: assessment of network performance using sag severity index[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2401-2409.

[26] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 187-196.
ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 187-196.

[27] 刘阳, 肖先勇, 刘旭娜, 等. 考虑用户定量需求的优质电力园区 DVR 优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 823-828.
LIU Yang, XIAO Xianyong, LIU Xuna, et al. Option configuration of DVR in premium power park considering customers' quantitative demand[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 823-828.

[28] 盛晓光, 韦统振, 马明, 等. 配电网中多台动态电压恢复器的优化配置研究[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2991-2996.
SHENG Xiaoguang, WEI Tongzhen, MA Ming, et al. Optimal configuration of multiple DVRs in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2991-2996.

[29] 陶顺, 骆晨, 薛佳佳, 等. 基于两阶段规划法的有源配电网综合电压优化控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 54-59.
TAO Shun, LUO Chen, XUE Jiajia, et al. Comprehensive voltage control optimization in active distribution network based on two-stage planning method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 54-59.

[30] 陈飞, 刘东, 陈云辉. 主动配电网电压分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 61-67.
CHEN Fei, LIU Dong, CHEN Yunhui. Hierarchically distributed voltage control strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 61-67.

[31] GHOSH A, JOSHI A. The concept and operating principles of a minicustom power park[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1766-1774.

[32] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags—part II: practical implementation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 925-932.

[33] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量经济性评估第 1 部分: 电力用户的经济性评估方法: GB/Z 32880.1—2016[S]. 2016.
National Standardization Technical Committees of Voltage, Current Ratings and Frequencies. Economic evaluation of power quality—part 1: economic evaluation method for the end-users: GB/Z 32880.1—2016[S]. 2016.

[34] 王玥娇. 优质电力园区电能质量等级划分与定价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Yuejiao. Research on power quality grading and pricing model in premium power quality park[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[35] ELARBI M, BECHIKH S, GUPTA A, et al. A new decomposition-based NSGA-II for many-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(7): 1191-1210.

收稿日期: 2020-10-04; 修回日期: 2020-12-28

作者简介:

陈卫东(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量; E-mail: chen_wd.sy@gx.csg.cn

姚知洋(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量; E-mail: 121842734@qq.com

郭敏(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量. E-mail: 329106373@qq.com

(编辑 葛艳娜)