

电压暂降治理的运营模式及其投资回报

华 桦^{1,2}, 李华强¹, 李文峰³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司建筑与民航设计院, 四川 成都 610000;
3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要:电压暂降的有效治理对于用户、电网及所在区域均为有利,比较治理电压暂降多种模式的投融资经济性评估具有实际应用价值。在此背景下,首先在用户自承担治理模式中提出以用户性价比最高为目标的优化配置模型;其次在服务费治理模式中提出多重考虑因素的租金模型;然后在 PPPO&M 模式中引入成本控制因素优化租金模型,基于引入政府方投资的 PPP 模式纳入区域经济效益与区域环境效益优化投资模型;最后以 4 种模式为基础,探讨不同治理模式的经济性评估,并在 IEEE 30 系统中进行仿真模拟,计算各方在各个模型中的净现值,内部收益率及投资回报周期,比较多种模式在同一条件下的经济性。

关 键 词:电压暂降;PPP 模式;投融资;经济性评估

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.018 中图分类号:TM714.2 文章编号:1673-9140(2022)01-0151-10

Research on operation mode of voltage sag control and its investment return

HUA Hua^{1,2}, LI Huaqiang¹, LI Wenfeng³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China, 2. Architectural and Civil Aviation Design Institute, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China, 3. State Grid Economic and Technological Research Institute of Henan Province State Grid Corporation of China, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Effective management of voltage sag is beneficial to users, power grids and the region where it is located. Comparing the investment and financing economic evaluation of various modes of voltage sag treatment has practical application value. This paper firstly proposes an optimal configuration model aiming at the highest cost-effectiveness for users in the user self-pay governance model. Secondly, a rental model is presented with multiple considerations in the service fee governance model. Then, the cost control factor is introduced into the PPPO&M model to optimize the rent model. The PPP model based on the introduction of government investment is incorporated into the regional economic benefit and regional environmental benefit optimization investment model. Finally, based on the four models, the economic evaluation of different governance models is discussed. Simulation is carried out in the IEEE 30 system to calculate the net present value, internal rate of return and investment return period of all parties in each model and compare the economics of multiply models under the same conditions.

Key words: voltage sag; PPP mode; investment and financing; economic evaluation

在《关于进一步深化电力体制改革的若干意见中发〔中发〔2015〕9号〕》等政策文件下发的背景下,电力行业掀起了一系列电力系统体制深度改革的浪潮。“三开放,一独立,三加强”的明确提出标志着电网企业将改变其在电力行业中的作用与功能,使电网企业新的环境中找到清晰的定位与可发展的方向。配售电公司给予客户的基础配售电服务已无法对已有或潜在用户的多样化、多层次的电力需求给予足够的支撑。在此情况下,配售电公司必须将自身服务体系充分提升与拓展,并建立新的付费服务体系,在保证一般用户的基础配售电业务的同时要尽可能的满足对多元化、多层次、多体系的电力增值服务有需求的新时代用户^[1],实现提升电能增值服务体系对于各类用户的吸引力,以达到与基础配售电服务同样的高市场需求率,从而有效地增强配售电公司自身的市场竞争力。

现代社会中,电能的高质量供给是满足信息化工业化的现代社会发展的必要条件,而电压暂降的治理问题是决定电能质量高低的重要组成部分。对于电力系统配售电公司的新老用户,高质量供电服务的需求十分强烈,而传统的用户自承担式的用电侧治理模式往往又会由于其设备维护成本较高和初期投资较大而难以顺利开展。随着社会不断地发展,在未来将会有更多的电力用户根据自身发展的需要向电力系统体系提出多元化优质供电的需求。由此可见,更改治理投资模式是解决电压暂降问题的关键,在“三开放、一独立、三加强”的售电侧开放背景下,基于电力增值服务或公私合作模式(public private partnership, PPP)的电压暂降治理措施具有较大的市场需求和可观的深挖潜力,使得该研究具有重要的现实意义。

国内外关于电压暂降问题的研究主要集中于判断电压暂降的发生区域、电压暂降治理的设备研发、相关治理策略的优化以及治理经济性和效率的评估,关于治理模式的投资方式与投资收益的研究较少。文献[2]研究用户侧具有高安装与维护成本的静止同步补偿器设备投资回报率指标,提出最优静止同步补偿器设备配置方案,但投资问题并未解决;文献[3-4]总结了电压暂降研究问题的现状,治理成本仍是电压暂降治理的重点考虑因素;文献[5-6]提

出园区设备电压暂降协同治理优化方案及其投融资策略,对新建园区或多敏感用户园区具有一定参考意义,但对于老旧园区,或敏感用户与非敏感用户混杂的园区,改造投资金额对于用户无法承担,且对零星用户的特殊需求无法满足。

本文通过模型构建方法、最优化配置讨论、经济效益分析等方法,针对以上问题研究基于电压暂降治理的多种运营模式及投资回报分析,旨在降低用户与售电侧电压暂降治理的资金成本最低值。同时满足配售电公司的电力增值服务有效利润的诉求,公共部门对于满足区域经济效益的诉求与提高区域投资经营环境指数的诉求。先后论述了治理电压暂降问题中的用户自承担模式、基于增值服务的服务费治理模式、基于外包类 PPP 模式中的委托运营模式(operations & maintenance, O&M)及引入政府方投资的 PPP 模式。提出 4 种费用计算模型,并通过仿真分析验证所提治理策略和治理模式,计算所有模式的净现值,内部收益率及投资回收期进行分析比较,找出最优投资模式。

1 电压暂降损失经济性评估

电压暂降的成本基于电压暂降造成的损失,为具有一定置信度的获得用户电压暂降损失数据,本文采用蒙特卡罗法^[7-8]评估电网中电压暂降发生类型、发生地点、持续时间,同时忽略事故阻抗大小来模拟在实际电网中发生的情况,凭借此方法对电网中的电压暂降事件进行分析与计算,结合一种精确确定电压暂降凹陷域的算法^[9-10],可以得到各用户的敏感设备所收到的电压暂降幅值的影响。通过将电压暂降事件发生时的电压暂降幅值、事件发生的持续时间与用户敏感设备的损失程度^[11]纳入考虑,就可以对短路故障发生所引发的电压暂降事件对用户侧造成的经济损失价值进行评估判断。

2 电压暂降治理模式及费用模型

电压暂降治理方式如图 1 所示。在用户侧,电压暂降的治理问题一般可以归结为加装设备的问题。目前应用最广的也是相对来说性价比较高的用

户侧治理电压暂降措施是在电网的供电线路与用户设备的用电接口处,即配电网与实际设备的接口处安装电压补偿装置以缓解扰动。这类电压暂降治理设备都是通过对有功和无功的补偿,使得在电网系统中输入到具体用户设备时,有功功率和无功功率的损失得以减少,进而维持电压的稳定。市面上较为常见的各种类型的电压补偿设备包括:不间断电源(uninterruptable power supply, UPS)、动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)等。而电网侧电压暂降治理方式可以基本分为安装故障限流器治理、采取架空线入地措施与安装绝缘措施。本文为清晰计算经济性,仅采用安装动态电压恢复器措施。

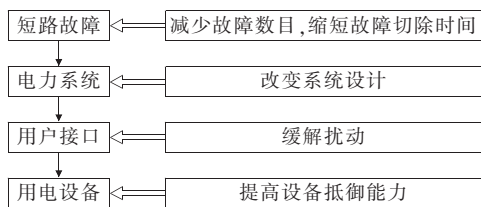


图 1 电压暂降治理方法

Figure 1 Voltage sag treatment method

2.1 用户自承担模式

在传统的动态电压恢复器配置的方法中,一般按照用户所在的节点对发生的最大电压暂降幅值进行配置。在配置治理电压暂降的设备容量时,为最大避免故障发生时对于敏感设备的影响,用户需配置至完全克服电压暂降影响的深度,但是配置电压暂降治理设备的根本目的是减少电压暂降造成的经济损失,动态电压恢复器配置需要资金支持,大深度的电压暂降治理设备消耗的资金相对较高,若按最大深度配置,项目整体经济性较低。因此按照性价比最高的策略配置电压暂降治理设备,对于不用完全避免电压暂降的用户是经济性最高的选择。本文采用按照其经济性效用对动态电压恢复器进行配置^[12],量化用户的经济损失再与电压治理措施的成本相比较,得出在经济性上对于用户最优的配置策略。

用户侧动态电压恢复器的投资成本可以用 DVR 采购费用与运行维护费用的和来表示。DVR 的采购费用为

$$G_{\text{dvr}} = SC_{\text{dvr}} \quad (1)$$

式中 S 为 DVR 的容量; C_{dvr} 为 DVR 单位容量的平均市场价格。

需要确定 S ,即为使用 DVR 时的容量,该容量与电压暂降发生时 DVR 输出的补偿电压与用户拥有设备的额定总容量有关,即

$$S = \frac{U_b}{U_e} S' \quad (2)$$

式中 U_b 为电压暂降发生时 DVR 输出的补偿电压; U_e 为用户设备的额定电压; S' 为用户拥有敏感设备的额定总容量。

2.1.1 用户自承担模式设备配置优化

本文采用净现值法将进行电压暂降治理后用户减少的经济损失看作用户侧的治理收益,考虑配置 DVR 的采购成本和维护成本,以配置 DVR 的最大容量为约束条件,以用户每年净现值最大为优化目标,即

$$N_{\text{NPV}} = -C_0 + \sum_{n=0}^{n_T} \frac{f_n C_d - C_w}{(1+r)^n} \quad (3)$$

式中 C_0 为电压暂降治理措施投资资金,一般可以视为 G_{dvr} ; C_d 为用户每次电压暂降的损失; C_w 为电压暂降措施每年的维护费用,一般取其设备成本的 5% 进行计算; r 为基础折现率; n 为电压暂降措施的寿命周期; f_n 为采取措施后减少的暂降次数。

本文采用蒙特卡罗法对电网的故障发生信息进行仿真模拟,利用电压暂降解析计算法^[12-13] 求取敏感用户节点的电压暂降情况,使用以用户侧净现值最大化的标准优化模型,并用遗传算法寻优^[14],具体流程如下。

1) 采用电压损失经济性评估对用户侧造成的损失做出判断。

2) 基础数据库采用上一步统计出的各敏感用户损失值,而变量则由 DVR 提供的补偿容量设置,对 DVR 的补偿容量进行种群初始化。

3) 对 DVR 的补偿容量进行遗传寻优操作(选择、交叉、变异),最终可以得到通过寻优计算后的各敏感用户配置 DVR 容量的方案。

4) 在算法中,设 p 为当前遗传代数; P 为整个流程最大遗传代数,本文取 500; k 为寻优计算中经过一定遗传代数后,适应度值连续不变的遗传代数; K 为寻找到最优适应度值的遗传代数。

2.2 基于增值服务的服务费治理模式

基于增值服务的服务费治理模式是指在用户向售电公司反映需求的敏感设备补偿容量,售电公司计算多家敏感用户再根据用户实际需求对其进行安装电压暂降治理设备的治理模式。此模式有效地控制售电公司范围内的敏感用户的电压暂降损失,分摊用户安装维护电压暂降设备的资金压力,并为售电公司提供有效的增值服务订单,此模式需要用户向售电公司签署电压暂降增值服务合同,提供电压暂降治理服务费^[14]。

1)用户侧向售电公司提出电能质量需求,并提交用户侧已有的敏感设备容量与计划安装敏感设备容量,售电公司得到用户侧所需安装电压暂降治理设备的总敏感设备容量。

2)售电公司对区域电能质量进行规划,根据用户所提出的所需保护敏感设备总容量提出解决方案。

3)售电公司根据后文所述的服务费用计算模型计算用户侧定期所缴纳的服务费用并与用户协商,并商讨服务时间限制,双方经过讨论直至达成一致后签订服务合同。

4)售电公司根据所签署的合同向电压暂降治理设备供应商定制电压补偿设备,在治理设备安装、调试直至正常运行后,标志合同正式生效,计算执行时间,在此期间售电公司按照合同承担电压暂降治理设备的运营维护费用。

5)用户按所定合同定期向售电公司缴纳服务费用。

在此治理模式下,用户侧安装电压暂降治理设备的资金门槛大大降低,缓解资金流动问题,将资金占比最大的最初设备采购安装费用压力转接给售电公司,用户侧生产经营项目不受资金影响,避免了安装维护电压治理设备所需的人工培训费用与设备全寿命周期费用。售电公司承担了安装治理设备的费用,相较于用户侧有更多电能设备维护经验,更有力地促进了专业分工,增加了电能增值服务营收。

租金是设备租用者为取得一定时间范围内设备的使用权而付出的资金成本,设备租出者在此时间范围内获得的出租收益。租金的计算直接关系到双方的经济效益问题,制定合理的租金计算模型对于双方都是有利的。需要从以下几个方面讨论租金的

制定问题。

①设备折旧费用。设备在试用期间,其价值会随着时间变化进行转移,设备在整个生命周期中一直伴随着有形磨损和无形磨损。

②大修理费用。在设备的运行期间,设备一旦出现较大故障无法继续运行,必须需要更换核心配件才可持续运转时,产生的费用为大修理费用。

③设备低劣化费用。设备在运行过程中,因长时间运行,设备机能下降,对于电压暂降的治理能力同样下降,而对于设备的维护成本是上升的,设备的使用时间越长,其维护费用越高,这就是设备低劣化。

④设备重置费用。当设备超过使用年限或者出现重大故障需要重新采购设备时为购买设备支付费用。

⑤资金贷款利息。在售电公司对于提供该项增值服务业务时,一般会采取银行贷款来购置设备,此项资金会产生贷款利息,为保障售电公司处理电能增值服务的利润,使之有动力继续开展此项业务,产生的利息应转嫁到租金上由用户侧提供。

⑥管理费用。售电公司运营维护设备产生的人工费用,材料费用。

⑦利润。售电公司提供电能增值服务业务的利润。

根据以上方面,租金 F_Z 的定制问题为

$$F_Z =$$

$$F_{z_j} + F_x + F_L + F_{cz} + F_d + F_g + F_r \quad (4)$$

$$F_{z_j} = a(S_0 - S_C)/n \quad (5)$$

$$F_x = bS_0 \quad (6)$$

$$F_L = \lambda'(n/2 - i) \quad (7)$$

$$F_{cz} = c(S_0 - S_C)/n \quad (8)$$

$$F_d = rS_i \quad (9)$$

$$F_g = dS_0 \quad (10)$$

$$F_r = eS_0 \quad (11)$$

式(4)~(10)中 F_{z_j} 为设备折旧费用; F_x 为设备大修理费用; F_L 为设备低劣化费用; F_{cz} 为设备重置费用; F_d 为资金贷款利息; F_g 为管理费用; F_r 为利润; n 为设备使用年限; i 为设备已经使用的年限; r 为银行贷款利息; λ' 为设备低劣化总值分摊到每年后的平均值; a 为折旧系数; b 为设备重置系数; c 为设备大修理费率; d 为设备管理费率; e 为

利润率; S_0 为设备原值; S_c 为设备使用年限到期时的设备残值; S_i 为设备已使用年限后的设备价值。

2.3 PPPO&M 模式

PPP 模式中的 O&M 模式为委托运营模式,引入私营企业对于成本控制影响,私营企业作为项目的主要开展机构,会更加注重项目的整体流程包括采购维护检修成本的控制,会引入优秀的管理机制,促进项目成本有序管控,对利润的追求会使项目在稳定推动的同时争取自身收益的最大化,整个项目的基础成本自然会下降,对于公共部门与私营企业来说都是有利的。售电部门凭借区域影响力接到用户电能质量需求,对私营企业开展竞标上位进行 PPPO&M 模式处理需求,招标流程按照图 2 所示。O&M 模式流程如图 3 所示。

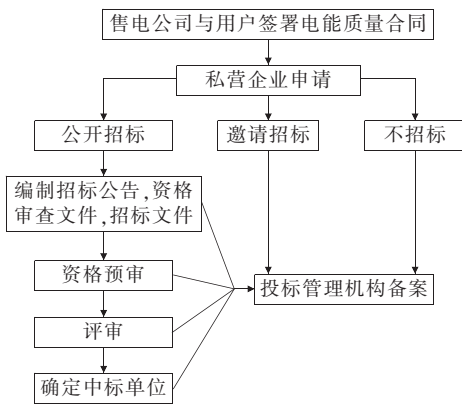


图 2 PPPO&M 招标流程

Figure 2 Flowchart of PPPO&M bidding

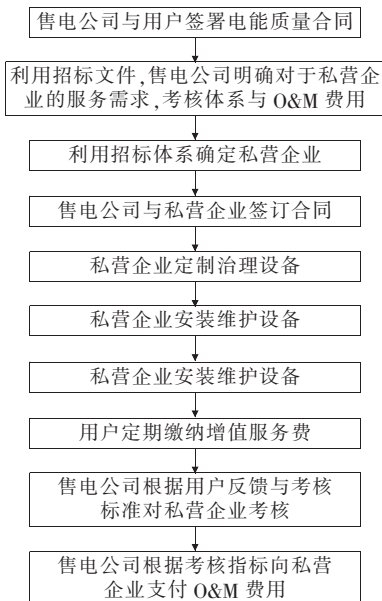


图 3 O&M 模式流程

Figure 3 Flow chart of O&M mode

1)对 PPPO&M 模式服务费用进行计算。售电公司凭借区域供电优势拿到与用户的电压治理增值服务合同后,将电压暂降治理服务竞标外包,并签订合同;私营企业根据售电公司与用户签署的电压质量合同向电压暂降治理设备供应商定制电压补偿设备,在暂降治理设备安装、调试直至正常运行后,标志售电公司与中标企业合同生效,也标识售电企业与用户侧合同正式生效,开始计算执行时间,在此期间中标企业按照合同承担电压暂降治理设备的运营维护费用;用户按所定合同定期向售电公司缴纳服务费用;售电公司按照合同定期根据用户反馈对向中标企业进行合同履行评级并支付费用。

2)对 O&M 模式服务费用进行计算。在设备折旧计算中,中标企业会根据招标公告详细计算所用 DVR 的容量及品牌,按低于市场平均价格的 DVR 单位容量费用完成合同所需的电压暂降治理效果,有效降低售电公司的采购费用,降低初始设备资金门槛;在设备大修理费用中,因品牌不同,设备修理频次可能变化,但在面临要更换核心配件才可持续运转的情况时,按低于市场平均价格的 DVR 单位容量费用采购核心部件,其总的大修理费用降低;在设备劣化值得计算中要考虑设备初始费用,中标企业降低初始费用,连带降低设备劣化值;同理可得在设备重置费用中,因单位采购价的降低,设备重置费用降低。

根据以上引入私营企业发生情况推断,租金 F'_z 计算模型调整为

$$F'_z = F_{zb} + F_f \tag{12}$$

$$F_{zb} =$$

$$\alpha F_{zj} + \beta F_x + \gamma F_L + \delta F_{cz} + F_d + F_g + F_r \tag{13}$$

$$F_f = fF_{zb} \tag{14}$$

式(12)~(14)中 F_{zb} 为中标企业采购运行维护设备需要资金; F_f 为售电公司作为 PPP 模式 O&M 发出方所得服务费; α 为私营企业降低设备折旧费用比率; β 为私营企业降低设备大修理费用比率; γ 为私营企业降低设备劣化值费用比率; δ 为私营企业降低设备重置费用比率; f 为售电公司获取服务利润。

2.4 引入政府方投资的 PPP 模式

因在电压暂降治理中,因电压暂降事件的减少,

用户侧效益增加,对于整体区域来说税收是增长的,基于此原理引入政府方投资进行电压暂降治理,此类投资涉及三方。

所在区域政府方主要税收来自于区域内工业化企业,大部分工业化企业都是电压暂降问题的承受者,政府方因发生电压暂降问题生产企业停工或生产效力下降,对于政府方的税收、区域投资环境及区域就业环境都会产生影响,因此将政府税收作为政府方的收益参与考虑,确定政府的积极参与。

售电公司提供主要电压暂降治理设备的运行维护能力,一是可以邀请政府方参与,降低资金参与;二是因政府方考虑的是整体地方税收,区域投资环境,及区域就业问题等深远影响,不影响售电公司提供增值服务时的收益问题。对于售电公司开展增值业务体系是有利消息。

用户侧是积极推动电压暂降治理问题的主要诉求者,这直接关乎企业的发展与收益,引入第三方政府方,因考虑的区域全体效益,对于企业来说,意味着租金的降低,用户的参与度与积极性会更好,反过来更好的促进区域全体效益的上升,对于用户侧来说也是利好。

三方合作对于三方都具有利好优势,合作的推动是有益且合理的。这也是多方治理、多方合作的公私合营模式,为典型的 PPP 模式。在此模式下,用户缴纳费用的主体单位变更为售电公司与政府方的合作运营单位,以售电公司与政府方的合作运营单位主管整体治理电压暂降事件的运行维护工作。这就涉及到合作运营单位的治理成本分摊的研究,需要保证政府投资的一定资金后,对于区域的经济效益提升的同时保证该投资是正收益,售电公司投资资金后提供管理及设备维护运营一系列条件,同时保证租金的收益合理的,双方均为正收益,产生一个政府方与售电公司的博弈体系。在保证双方的投资经济性的基础上,用户的租金问题将会被影响,因租金的降低是对于区域管理的利好,租金越低,更多的企业会参与到整体电压暂降的处理上,区域税收增加,而售电公司需要在每个用户上收取更多的利益,增加电压暂降增值服务收益,这就是博弈的关键问题,本文对于双方进行效用分析,分析博弈关系。

2.4.1 投资博弈关系计算

假设治理的总体成本为 C ,其中政府的投资额度为 Z ,其余部分由售电公司承担,在进行基于增值服务的电压治理项目后,减少的损失为 J ,则政府方收益为税收率乘以 J ,用户因电压暂降问题造成的损失越少,整体区域投资环境,区域就业环境的会相应提升^[6],因此区域投资环境,区域就业环境的收益可以根据 J 计算,可得出政府收益为

$$Z_s = uJ \quad (15)$$

$$Z_h = vJ \quad (16)$$

式中 Z_s 为政府增加的税收收益; u 为政府税收率; v 为进行电压暂降治理后对于区域的无形收益、投资环境、就业环境的提升系数,因此政府方取得的具体收益为

$$P_z = Z_s + Z_h - Z = (u + v)J - x_1 C \quad (17)$$

售电公司提供电压治理增值业务合理的取的租金为

$$F_z = eS_0 \quad (18)$$

式中 e 为售电公司提供增值服务利润收益率; S_0 为设备初始资金,可以视为投资总额,即为 C ,则售电公司投资额度为 $C - Z$,其利润为

$$F_R = e(C - Z) \quad (19)$$

其收益为

$$P_s = e(C - Z) - x_2 C \quad (20)$$

式中 x_1 、 x_2 为政府与售电企业分摊的投资成本,均在 $(0, 1)$ 区域内。

2.4.2 引入政府方投资的 PPP 模式的议价模型

本文采用纳什博弈(非合作博弈)考虑,提出议价模型中需要考虑双方的议价问题,加以以最大纳什积为目标,以双方最小收益期望为限制条件,确定双方的投资比例。模型为

$$\text{Max}(P_z - P_{zd})^{\epsilon_1} (P_s - P_{sd})^{\epsilon_2} \quad (21)$$

式中 P_{zd} 为政府方收益最低期望; P_{sd} 为售电公司收益最低期望。 $P_z - P_{zd}$ 应大于等于零, $P_s - P_{sd}$ 应大于等于零,在上述投资中, x_1 、 x_2 为政府与售电企业分摊的投资成本,因为政府对企业的投资收到限制,本文规定为 30%;即 x_1 小于等于 30%, ϵ_1 、 ϵ_2 为政府方与售电公司的谈判能力,且 ϵ_1 与 ϵ_2 都位于 $[0, 1]$, $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 1$ 。该式子在约束双方进行谈判

的同时同样保证了双方净收益是正值,至少一方的净收益增加,另一方净收益不减少。

2.5 投资经济性计算

利用净现值、内部收益率及投资回收周期这 3 个指标对上文提出的 4 种投资模式进行经济性分析。

净现值法为

$$N_{NPV} = \sum_{t=0}^n (C_{I_t} - C_{O_t})(1 + i_0)^{-t} \quad (22)$$

内部收益率为

$$N_{NPV}(i_r) = 0 \quad (23)$$

投资回收期为

$$T_p = T_N - 1 + \frac{F_{LT_{N-1}}}{F_{T_N}} \quad (24)$$

式中 T_p 为投资的回收期; T_N 为项目累计的各个年份的净现金流首次为非负的年份; $F_{LT_{N-1}}$ 为在第 $T_N - 1$ 年时的前各个年累计的净现金流; F_{T_N} 为年份 T_N 时的净现金流。

3 仿真计算

为验证本文所提电压暂降治理模式与治理策略,本文以 IEEE 30 标准节点系统进行仿真模拟与经济性计算,假设所有的变压器均采用 Y0/Y0 接线方式,如图 4 所示。

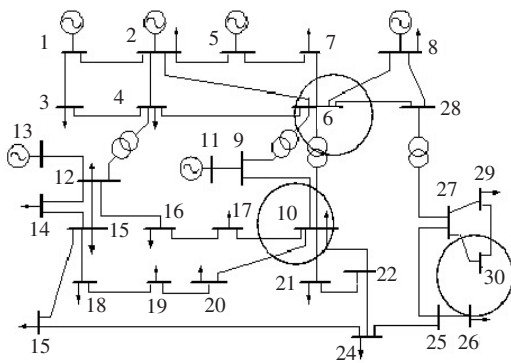


图 4 IEEE 30 标准节点系统

Figure 4 IEEE 30 standard node system

IEEE 30 系统中不同的事故类型发生概率通过表 1 进行表示。在电压暂降故障中,敏感用户的电压耐受值按照表 2 所示。为增加本文可信度,调研选取了西南地区某工业园区中的 3 个典型工业敏感用户,得到其信息如表 3 所示。为不失广泛性,假设这 3 个用户分别位于节点 6、10、30 处。

表 1 IEEE 30 不同事故概率

Table 1 IEEE 30 different accident probability

故障类型	线路故障率/(次/(100 km))
单相接地	2.000
两相接地	0.300
两相短路	0.125
三相短路	0.100

表 2 敏感用户的电压耐受值

Table 2 Voltage tolerance of sensitive users

设备幅值/%	耐受时间/ms
$u < 70$	$t < 50$
$70 < u < 80$	$50 < t < 200$
$80 < u < 90$	$200 < t < 500$
$u > 90$	$t > 500$

表 3 不同节点处用户情况

Table 3 User situation at different nodes

节点	行业	单次电压暂降事件造成平均损失/(万元/次)	敏感负荷容量/(kV · A)
6	制药	11.8	1 000
10	半导体	42.6	1 500
30	化纤	21.3	2 000

本文根据市场调查,得到一般设备厂商的 DVR 市场均价 1 kV · A 为 3 000 元左右,假设各个敏感用户在自承担模式下采用文 2.2 节遗传算法模型进行计算,则各个敏感用户的最优 DVR 配置如图 5 所示。

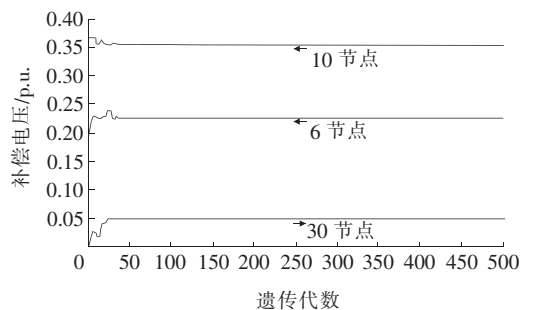


图 5 不同节点敏感用户的最优 DVR 配置

Figure 5 Optimal DVR configuration for sensitive users at different nodes

根据图 5 可知,6 节点最优配置容量为 230 kV · A,10 节点最优配置为 525 kV · A,30 节

点最优配置为 100 kV · A。不同节点处最优配置容量及减少损失如表 4 所示。

表 4 不同节点处最优配置容量及减少损失

Table 4 Optimal configuration capacity and loss reduction at different nodes

节点	最优配置容量	初期投资成本/万元	减少电压暂降频次/(次/a)	每年减少损失/万元
6	230	69.0	4.56	53.81
10	525	157.5	2.76	117.58
30	100	30.0	1.54	32.80

3.1 用户自承担模式

在实际计算中,根据文 2.1 对以上用户按照基准折现率 7%,考虑低劣化值治理能力按 6%递减,考虑大修理费用及重置费用,维护成本按照 8%递增,设备寿命按照 15 a 计算,对净现值,内部收益率及投资回收期进行计算,对其经济性进行分析,如表 5 所示。

表 5 用户自建模式投资经济性分析

Table 5 Investment economic analysis of user-built model

节点	参与方	净现值/万元	内部收益率/%	投资回收期/a
6	用户	170.37	59	2.512 180
10	用户	356.58	56	2.595 304
30	用户	132.00	92	2.007 248

3.2 基于增值服务的服务费治理模式

在同等条件下,即在相同电压暂降条件,根据文 2.2 节用户的服务费模型向售电公司缴纳服务费用,可以免去对于用户的初始资金压力,假设将折旧系数 a 设为 20%;设备重置系数 b 设为 5%;设备大修理费率 c 设为 3%;设备管理费率 d 设为 2%;利润率 e 设为 6%;设备使用年限 n 为 15 a,按签订合同 8 a 进行计算,利用文 2.2 节所述服务费用计算模型对租金进行计算,如表 6 所示。

在同等条件下,即相同电压暂降时事件发生条件,用户根据文 2.3 节的服务费模型向售电公司缴纳服务费用,假设将折旧系数 a 设为 20%;设备重置系数 b 设为 5%;设备大修理费率 c 设为 3%;设备管理费率 d 设为 2%;利润率 e 设为 6%;设备使用年限 n 为 15 a,按签订合同 8 a 进行计算;售电公

司获取服务利润 f 设为 4%;保守估计私营企业设备折旧费用比率 α 设为 1;保守估计私营企业设备大修理费用比率 β 设为 0.8;保守估计私营企业设备劣化值费用比率 γ 设为 0.95;保守估计私营企业设备重置费用比率 δ 设为 0.8。利用文 2.3 节所述服务费用计算模型对租金进行计算,如表 7 所示。

表 6 服务费模式投资经济性分析

Table 6 Investment economic analysis of service fee model

节点	参与方	净现值/万元	内部收益率/%	投资回收期/a
6	用户	186.39	—	—
	售电公司	16.19	17	4.676
10	用户	399.42	—	—
	售电公司	39.69	17	4.676
30	用户	127.72	—	—
	售电公司	7.04	17	4.676

表 7 O&M 模式投资经济性分析

Table 7 Economic analysis of O&M model investment

节点	参与方	净现值/万元
6	用户	200.61
	售电公司	2.56
10	用户	431.87
	售电公司	5.84
30	用户	133.90
	售电公司	1.11

3.4 引入政府方投资的 PPP 模式

3.4.1 投资博弈问题

政府方与售电公司博弈模型的求解方法选用内点法,可快速求解。假设税率为 $u = 7%$,对整体区域投资环境,区域就业环境的提升影响为 $v = 4%$,同时设定政府方的谈判能力 $\epsilon_1 = 0.45$,售电公司谈判能力 $\epsilon_2 = 0.55$,根据计算模型中的数据可得到双方收益的具体表达式。根据约束条件,该模型中一方的收益低于 0 时,谈判不再进行。根据投资基准,即双方均须投入资金,进行求解,得到双方的最优投资比例为: $x_1 = 0.124, x_2 = 0.876$ 。则政府方需要承担投资比例为 12.4%,售电公司需要承担的比例为 87.6%。

3.4.2 引入政府方投资的 PPP 模式经济效益分析

在文 3.2 节同等条件下,即相同电压暂降条件,

用户根据文 3.2 节的服务费缴纳,假设将折旧系数 a 设为 20%;设备重置系数 b 设为 5%;设备大修理费率 c 设为 3%;设备管理费率 d 设为 2%;利润率 e 设为 6%;设备使用年限 n 为 15 a,按签订合同 8 a 进行计算,利用文 2.5 节所述对双方投资经济性进行计算,如表 8 所示。

表 8 政府方 PPP 模式投融资分析

Table 8 Investment and financing analysis of the PPP model for government

节点	参与方	净现值/ 万元	内部收益 率/%	投资回收 期/a
6	用户	186.39	—	—
	售电公司	9.57	12	5.67
	政府方	19.13	46	2.86
10	用户	399.42	—	—
	售电公司	21.83	12	5.67
	政府方	40.99	44	2.97
30	用户	399.42	—	—
	售电公司	4.16	12	5.67
	政府方	13.11	65	2.83

4 结语

在用户自承担模式下,配置 DVR 不单看是否完全治理了电压暂降,而应该从本质出发,关注电压暂降的治理结果是否为用户的最具性价比选择,本文以用户的最大净现值为标准出发,构建了模型,使得用户配置治理电压暂降设备具有经济性层面的评估,提高了资源利用率,为用户提供了电压暂降治理的优化配置。

在基于增值服务的服务费治理模式下,降低了用户治理电压暂降的资金压力,缓解了电压暂降治理初期投资巨大的问题,将设备的维护与残值处理完全交给了售电公司,具有良好的经济性,为售电公司开拓出电能增值服务的新领域。售电公司在售电侧开放的背景下寻找到新的利润增长点,为电网售电侧开放打开了新的局面。

在 PPPO&M 模式下,引入私营企业对于成本控制影响,加强增值服务的成本控制,将售电公司中心化,交易市场化,售电公司与私营企业凭借双方对

于项目推动的优势,完成了压低成本的任务,使得售电公司完全没有资金压力,可以更好的开拓电能增值服务市场,为扩大投资规模,提升利润提供了一个新的角度。

在引入政府方投资的 PPP 模式下,引入区域经济效益影响,使得电压暂降治理的利益优势扩散,引入博弈论计算,为政府方投资售电公司比例提供了理论基础,使得双方在成本分配上完成理论构建,产生一个政府方与售电公司的博弈体系,为双方找出利益增长点,为更多方面 PPP 模式合租打下了基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LU J Z, CHEN S Y, LI B, et al. An optimal reactive power compensation allocation method considering the economic value affected by voltage sag[C]//2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China; IEEE, 2018:1-6.
- [3] SANTOS A D, BARROS M T C D. Sensitivity of voltage sags to network failure rate improvement [C]//2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, Italy; IEEE, 2016:1-7.
- [4] 欧阳森,陈义森.一种可提取受波动干扰的电压暂降特征的信号处理方法[J].高压电器,2020,56(8):17-22.
OUYANG Sen, CHEN Yisen. Signal processing method for extracting the voltage sag feature with voltage fluctuation interference[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):17-22.
- [5] 高文浩,赵海兵,殷爽睿,等.考虑负荷虚拟储能特性的商业区储能优化配置[J].中国电力,2020,53(4):96-104.
GAO Wenhao, ZHAO Haibing, YIN Shuangrui, et al. Optimal configuration of BESS in commercial area considering virtual energy storage characteristics of load

- [J]. *Electric Power*, 2020, 53(4):96-104.
- [6] 肖先勇,赵禾畦,李成鑫. 园区级—设备级电压暂降协同治理优化方案及其投融资策略[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(5):157-165.
XIAO Xianyong, ZHAO Heqi, LI Chengxin. Optimal cooperative governance scheme of park-level and equipment-level voltage sag and its investment and financing strategy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5):157-165.
- [7] 胡长青,曹爱民,黄研利,等. 基于实测数据的陕西电网电压暂降特征分布分析[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9):69-74.
HU Changqing, CAO Aimin, HUANG Yanli, et al. Analysis of voltage sag characteristic distribution in Shaanxi power grid based on measured data[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9):69-74.
- [8] 刘海涛,叶筱怡,吕干云,等. 基于最优组合赋权改进 S 变换的电压暂降检测方法[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(15):47-52.
LIU Haitao, YE Xiaoyi, LV Ganyun, et al. Modified S-transform method of voltage sag detection based on optimal combination weights[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(15):47-52.
- [9] 谢伟伦,薛峰,黄志威. 基于网络传播特性的配电网电压暂降随机预估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(8):163-171.
XIE Weilun, XUE Feng, HUANG Zhiwei. Stochastic estimation method of voltage sags for a distribution network based on network propagation property[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(8):163-171.
- [10] 潘霄,梁毅,张娜,等. 电压跌落下 MMC-HCVD 负序电流抑制策略研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(7):38-43+56.
PAN Xiao, LIANG Yi, ZHANG Na, et al. Research on control strategy of negative sequence current suppression of MMC-HCVD under voltage drop[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(7):38-43+56.
- [11] SANTOS A D, BARROS M. Predicting equipment outages due to voltage sags[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(4):1683-1691.
- [12] ZHANG T, LIU H, ZENG Q H, et al. A comprehensive evaluation for the power supply reliability in distribution network based on improved entropy method [C]//*Proceedings of 2019 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019)*, Hangzhou, China, 2019:119-125.
- [13] 梁振锋,祖莹,刘伟,等. 基于用电信息采集数据的电能质量分析[J]. *供用电*, 2020, 37(10):58-64.
LIANG Zhenfeng, ZU Ying, LIU Wei, et al. Power quality analysis based on power consumption information acquisition data[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(10):58-64.
- [14] 李文峰,武玉丰,白宏坤,等. 基于电力增值服务的电压暂降治理模式研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(17):36-41+52.
LI Wenfeng, WU Yufeng, BAI Hongkun, et al. Research on voltage sags control mode based on power value-added services[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(17):36-41+52.