

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

肖先勇,赵禾畦,李成鑫
(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:工业用户在生产过程中受电压暂降影响承受着巨大的经济损失,对电压暂降治理有强烈需求。为了经济、高效地治理园区电压暂降问题,提出一种园区级-设备级电压暂降协同治理优化方案及其投融资策略。考虑治理装置技术指标特性,根据用户敏感设备的耐受时间,将敏感设备分组,分别采用园区级和设备级治理;根据敏感设备的耐受电压,对设备级治理再进行分组,实现设备级多级治理。考虑园区级和设备级治理装置的购置、运维、安装等成本,以园区净收益最大为目标,满足分组电压、容量等约束,建立园区级-设备级电压暂降协同治理优化模型。提出一种考虑博弈关系和成本合理分摊的公私合营模式作为投融资策略,明确划分园区管委会、用户的成本分摊比例,实现各参与方投资收益比相等。对西南地区某工业园区进行实例分析,结果表明所提园区级-设备级电压暂降协同治理优化方案经济、可行,可为推动各方参与的电压暂降市场化解决方案提供思路。

关键词:园区级-设备级;电能质量;协同治理;电压暂降;投融资策略

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005013

0 引言

以晶圆制造、汽车制造等为代表的高端制造业的生产环节对电压暂降非常敏感,相关生产环节因电压暂降而停机的情况频发,造成了巨大的经济损失,用户抱怨严重。敏感用户对电压暂降治理需求迫切^[1-2]。电压暂降治理工作可分层分级开展,包括电网级治理、园区级治理、设备级治理。在实施过程中,电网级治理因具有投资成本高、周期长、审批环节繁琐等缺点,尚未作为主要治理手段而大量应用;园区级、设备级治理是目前广泛采用的主流治理层级。

工业界和学术界围绕园区级、设备级治理开展了大量的研究,研究内容主要包括治理装置研发^[3-5]、治理装置优化配置^[6],基本解决了固态切换开关(SSTS)、动态电压恢复器(DVR)、基于直流供电技术的电压暂降保护(VSP)系统^[7]等主流治理装置的研制及配置问题,但仍存在以下3个主要问题,限制了园区级/设备级治理的发展、应用。

(1)园区级/设备级治理通常独立配置治理装置,未能实现多装置之间的协同配合。目前市场上主流治理装置的治理效果可根据响应时间、补偿容量、补偿时间、补偿精度等多项指标进行评价。园区内存在耐受能力不同的多类敏感设备,对相关技术指标需求各异。采用多台治理装置进行园区电压暂降的协同治理,可充分根据多类敏感设备的不同耐

受能力的差异,合理选取技术指标,实现治理的技术经济性最优。

(2)治理装置的参数选择未考虑设备耐受特性。目前,治理装置容量、补偿电压的选择主要取决于受补偿的敏感设备的额定参数,忽略了设备的耐受能力,造成了过补偿。以交流接触器(ACC)为例,国内外大量的测试证明其耐受电压为额定电压的20%~72%^[8-12]。那么,若不清楚被治理ACC的耐受能力,则治理装置的补偿电压只需配置为额定电压的75%左右,就可实现对ACC的暂降治理;若明确知道被治理ACC的耐受能力,则补偿电压可以设置得更加合理,防止过补偿的情况。目前,国内外对可调速驱动器(ASD)^[13-14]、可编程逻辑控制器(PLC)^[15-16]等敏感设备进行了大量测试,相关成果都应合理应用到补偿装置技术参数的配置中。

(3)电压暂降治理的投资问题尚未形成市场化解决途径。政府、电网公司、用户等都是治理问题的相关方,但各方的投资-收益不明确,责任-权益不清晰,导致目前的治理问题存在各方推诿的情况。因此,亟需提出一套合理的投资机制,形成市场化投资方案,解决电压暂降治理的投资与收益问题。

为了应对上述挑战,本文以敏感设备的耐受能力为切入点,提出一种园区级-设备级电压暂降协同治理优化方案。根据园区级和设备级治理装置的特性,结合敏感设备的耐受能力,对敏感设备进行分级、分组治理;以园区净收益最大为目标,满足经济性、分组电压等约束,建立园区级-设备级电压暂降协同治理优化模型,明确治理方案;提出考虑博弈关

收稿日期:2019-09-22;修回日期:2020-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807126)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807126)

系和成本合理分摊的多方参与的协同治理投融资策略,计算各参与方的投资比例及投资收益比。最后,应用本文所提方法对西南地区某工业园区进行实例分析,证明所提方法的合理性和有效性。本文研究工作可为推动各方参与的电压暂降市场化解决方案提供思路。

1 园区级治理与设备级治理

园区内常用的电压暂降治理装置包括 SSTs、DVR、不间断电源(UPS)、基于直流供电技术的 VSP 系统等,不同类型的装置具有不同的特点,适用的电压等级、场景也不同。根据装置应用场景与特点的不同,可将它们分为园区级治理装置、设备级治理装置,相对应的治理层级分别为园区级治理、设备级治理。

1.1 园区级治理

对于可靠性需求较高的园区而言,其供电方式一般采用双电源供电。园区级治理是通过园区级治理装置快速切换电源进线,降低电压暂降的影响。常用的园区级治理装置是 SSTs,其一般用于 10 kV 电压等级。

SSTs 的工作机制是通过检测进线和出线的三相电压和电流,识别电压暂降,再控制快速开关和阀体,实现 2 路进线电源的快速切换,缓解电压暂降对敏感设备的影响。它是解决敏感负荷电力供应最经济有效的手段之一。SSTs 最快能在 1/4~1 个周期(5~20 ms)内实现电源切换,保证园区内绝大多数敏感设备不受电压暂降的影响;对于耐受时间短于电源切换时间的敏感设备而言,SSTs 难以实现电压暂降治理^[17]。快速开关类治理装置安装在园区母线上,为园区内所有用户提供一定程度的保障,减轻了用户单独进行治理的压力。

园区级治理的优势包括以下 2 个方面:①配置在园区级别,能解决大部分敏感设备的电压暂降治理问题,是园区后续吸引新企业入驻的优质供电亮点;②经济性较高,当园区存在较大容量的典型敏感负荷时,相较于用户单独购置低压补偿装置,园区级治理的成本投入明显降低。

1.2 设备级治理

设备级补偿装置一般指含能量储存单元,并能在短时间内对敏感设备进行功率补偿的定制电力设备。目前 380 V 电压等级的产品应用较为成熟,10 kV 电压等级的设备级治理装置的应用较少。DVR 是一种典型的设备级治理装置,正常情况下其处于旁路状态,当发生电压暂降时,此类设备以毫秒级的响应速度为负荷提供功率补偿,使负荷的供电电压恢复到正常值。DVR 被认为是目前治理电压暂降最有效的手段之一。UPS 也是一种广泛使用的设备级补偿装置。UPS 串联在负荷前端,经整流-储

能-逆变环节后为负荷供电,当发生电压暂降时,能为负荷提供稳定电压。类似地,基于直流供电技术的 VSP 系统通过为变频器的直流母线提供稳定直流电压,维持变频器逆变部分正常工作,保证所连接的重要负荷不会停机。可见,设备级补偿更具针对性和快速性。

设备级治理方式一般被广泛应用于 380 V 电压等级。相较于 10 kV 侧的治理,低压侧的治理价格更为低廉、更易安装和维护。

1.3 园区级-设备级协同治理的优势

基于用户敏感设备的耐受能力,结合园区级和设备级治理装置的工作特点,将敏感设备划分为两大类,分别由园区级、设备级治理装置进行电压暂降治理。当发生电压暂降时,2 类治理装置可协同作用,保障所有敏感设备不受电压暂降的影响。

本文将这种园区级和设备级治理装置协同作用、共同治理电压暂降的治理方式定义为园区级-设备级电压暂降协同治理(下文简称为协同治理)。通过在园区内合理组合、配置园区级和设备级治理装置,科学设置各装置的开关动作时序,充分利用 2 种治理方式的技术优势。本文所提协同治理方式采用 DVR 在 380 V 低压侧补偿耐受时间小于 5~20 ms 的敏感设备,采用 SSTs 切换 10 kV 双电源,在 5~20 ms 后实现对其他敏感设备的电压暂降治理,合理利用园区级、设备级治理装置的动作时间特点,分组治理不同的敏感设备。

2 考虑协同治理的敏感设备分组方法

电压暂降协同治理的关键之一是敏感设备分组。根据设备的耐受能力,将其合理分组,分别应用园区级或设备级治理装置进行治理,优化治理方案。

2.1 敏感设备膝点

典型电压耐受曲线(VTC)可分为矩形和非矩形 2 类,见图 1。根据已有测试成果,ASD、PLC、个人计算机(PC)、变频器的典型 VTC 都是矩形^[18-19],如图 1 中的 VTC₁ 所示。该类敏感设备的耐受时间、电压幅值可分别通过膝点的横、纵坐标值获得。图 1 中,点 Q₁ 为 VTC₁ 的膝点,其横坐标为敏感设备的耐受时间 T₁,持续时间小于 T₁ 的电压暂降不会对此类敏感设

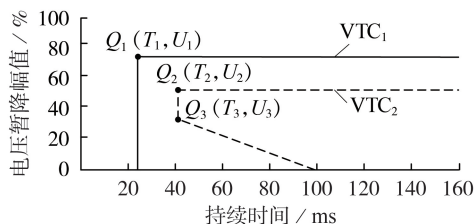


图1 典型 VTC 示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical VTCs

备造成影响;点 Q_1 的纵坐标为耐受电压 U_1 ,敏感设备的正常运行需满足供电电压高于耐受电压。

非矩形VTC是以ACC、低压脱扣器等为代表的敏感设备在波形点为 0° 时的耐受曲线(当波形点为 90° 时,其VTC为矩形),如图1中的VTC₂所示。点 Q_2 和 Q_3 为VTC₂的膝点,针对该类VTC,需从严讨论其耐受特性,以点 Q_2 的横坐标 T_2 、纵坐标 U_2 代表其耐受特性。

通过园区实地调研获得敏感设备的膝点数据及设备的额定容量,结合园区级、设备级治理装置的不同工作特性与技术参数,对敏感设备进行分组。敏感设备分组结果如图2所示。

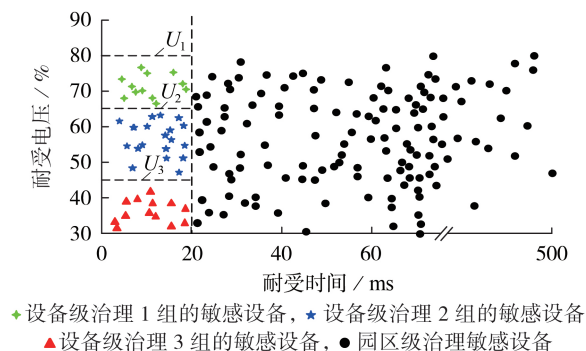


图2 协同治理下敏感设备分组示意图

Fig.2 Schematic diagram of sensitive equipment division under cooperative governance

2.2 敏感设备分组——园区级治理

以园区级治理装置的典型切换时间为分界值,对敏感设备进行第1次分组。园区级治理常用装置为SSTS,考虑动作时间和响应时间,该类装置的典型切换时间为5~20 ms。对于耐受时间大于20 ms的敏感设备而言,可将其划分至园区级治理范围;对于耐受时间小于20 ms的敏感设备而言,采用响应速度更快的设备级治理装置对其进行治理。本文采用20 ms为园区级治理的典型切换时间,图2中耐受时间大于20 ms的敏感设备均被划分至园区级治理范围。

2.3 敏感设备分组——设备级治理

对于耐受时间小于园区级治理典型切换时间的设备而言,可对其进行第2次分组。第2次分组以设备耐受电压为主要划分依据。当发生电压暂降时,若供电电压在膝点耐受电压以上,则不会导致敏感设备停机或故障,能保证设备在短时间内正常运行。但各设备的最低供电电压需求(膝点的纵坐标)是不同的。基于不同的敏感设备对供电电压的定量需求,对敏感设备进行第2次分组。以配置3台DVR进行设备级补偿为例,3台治理装置分别为具有不同电压需求的敏感设备进行补偿,由图2可知,敏感设备被划分至3个不同组,设备级治理1组的敏感设

备耐受电压介于65%~80%之间,当有DVR的支撑后,馈线电压达到80%就能确保1组内相应需求的敏感设备正常工作;设备级治理2组、设备级治理3组的敏感设备所需馈线电压分别为65%、45%。

根据敏感设备的电压需求进行分组治理,避免了使用大容量的单台补偿装置,具有更好的经济性。在进行分组时,应合理考虑敏感设备台数、容量和电压需求等,以优化配置各组补偿容量。

3 协同治理优化方案

3.1 协同治理目标

优化配置各组补偿容量应以经济性最优为原则。协同治理的成本主要由园区级治理装置和设备级治理装置的成本共同构成。

园区级治理装置成本包括购置治理装置的初始费用 C_1 和运维成本年值 C_{mp} 。初始费用 C_1 是固定值,不受用户数量和敏感设备数量的影响。

设备级补偿装置成本包括补偿装置容量成本 C_2 、电缆铺设总成本 C_3 、配件成本 C_4 和运维成本年值 C_{me} 。初始成本是一次性成本,不需要考虑时间价值。运维成本具有时间价值,需对其进行折算,以便利用现值进行下一步优化分析。本文采用的折算公式^[20]如式(1)所示。

$$C_{m(P/e)} = C_{M(P/e)} \frac{(1+i)^{n_1} - 1}{i(1+i)^{n_1}} \quad (1)$$

其中, C_{mp} 、 C_{me} 分别为园区级、设备级装置运维成本的现值; i 为折现率; n_1 为寿命期限。园区级与设备级治理装置采用相同的折算公式。

容量成本 C_2 由治理装置的容量决定,单位容量成本 c_2 是容量 S 的函数,即 $c_2 = f(S)$ 。以DVR为例,经调研得到DVR成本与容量间的函数关系见图3。

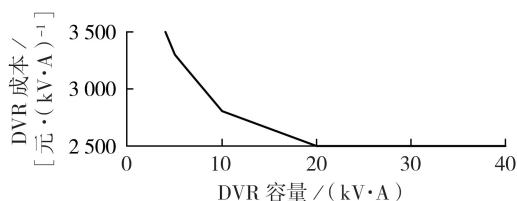


图3 DVR单位容量成本与容量间的函数关系

Fig.3 Function relationship between unit capacity cost and capacity of DVR

容量成本 C_2 的计算式如式(2)所示。

$$C_2 = \sum_{j=1}^N c_{2j} S_j \quad (2)$$

其中, S_j 为第 j 台设备级装置的容量; N 为设备级装置的数量; c_{2j} 为第 j 台设备级装置的单价。

治理装置一般安装在园区配电房,从配电房铺设电缆为各组敏感设备分组供电。电缆铺设总成本

C_3 与各用户至配电房的总距离 d 成正比,计算式如式(3)所示。

$$C_3 = c_3 \sum_{k=1}^{N_k} d_k \quad (3)$$

其中, c_3 为铺设单位距离电缆的成本; d_k 为用户 k 至配电房的电缆铺设长度; N_k 为园区内的用户数。

设备级装置配件成本 C_4 与设备级装置数量 N 有关,计算式如式(4)所示。

$$C_4 = Nc_4 \quad (4)$$

其中, c_4 为单位配件成本。

对于园区内的协同治理优化问题,考虑到实际投资与建设的可行性和经济性,本文以协同治理的净收益最大为目标函数,如式(5)所示。

$$\max B = F - M \quad (5)$$

$$F = f \frac{(1+i)^{n_1} - 1}{i(1+i)^{n_1}} \quad (6)$$

$$M = k_1(C_1 + C_{mp}) + C_2 + C_3 + C_4 + C_{me} \quad (7)$$

其中, B 为协同治理的净收益; f 为进行协同治理后园区用户平均每年减少的因电压暂降导致的经济损失; F 为有效年限内园区用户减少的因电压暂降导致的总经济损失; M 为园区治理总成本; k_1 为园区级治理约束参数。

3.2 协同治理约束

(1)园区级治理约束。

园区级治理装置的投资成本较高,如果园区用户的经济损失不大,有可能在设备运行有效年限内可减少的损失值小于园区级治理总成本。本文用经济性检验参数 k_1 约束园区级总成本,如式(8)所示。

$$k_1 = \begin{cases} 0 & C_1 + C_{mp} \geq P \\ 1 & C_1 + C_{mp} < P \end{cases} \quad (8)$$

$$P = p \frac{(1+i)^{n_1} - 1}{i(1+i)^{n_1}} \quad (9)$$

其中, P 为耐受时间大于20 ms的敏感设备在有效年限内减少的因电压暂降导致的总经济损失; p 为耐受时间大于20 ms的敏感设备平均每年减少的因电压暂降导致的经济损失。如果园区级治理装置的购置、初装、运行等费用大于或等于其治理后减少的经济损失,则 $k_1=0$,该园区不采用园区级治理方式。

(2)设备级补偿分组电压约束。

由设备级治理装置进行补偿的敏感设备共分为 J 组,每组需达到的补偿电压为该组设备的最高电压需求,由此确定第 j 组的补偿电压应达到 U_j 。考虑最坏情况短时中断,补偿电压等于所需电压。

$$U_j \geq \max \{U_{\text{demand}(r)}^j\} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (10)$$

其中, $U_{\text{demand}(r)}^j$ 为第 j 组内第 r 台敏感设备的耐受电压, $0 < r \leq R_j$ 且 r 取整数, R_j 为第 j 组内敏感设备的总数。

(3)设备级治理装置容量约束。

已知各用户每台敏感设备的额定容量,存在不同组别对应的设备级治理装置容量等式约束条件,如式(11)所示。

$$S_j = \frac{U_j}{U_n} \sum_{r=1}^{R_j} S_r^j \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (11)$$

其中, U_n 为额定电压; S_r^j 为第 j 组内第 r 台敏感设备的额定容量。

(4)电缆铺设成本约束。

每个用户的敏感设备分处于不同组别会影响用户从配电柜引出的电缆数量,即电缆铺设长度满足约束式(12)。

$$d_k = \sum_{j=1}^J \mu_{kj} d_{kj} \quad (12)$$

其中, d_{kj} 为用户 k 的敏感设备到第 j 组的电缆铺设长度; μ_{kj} 为用户 k 的敏感设备是否被分到第 j 组的状态变量,若被分到第 j 组则 $\mu_{kj} = 1$,否则 $\mu_{kj} = 0$ 。

3.3 协同治理优化求解

针对式(5)所示优化问题,本文采用搜索算法搜索该问题的全局最优解。本文在传统搜索算法的基础上,根据问题的特性、约束条件等,对一些显然无法得到最优解的搜索方向进行了剪枝,从而有效降低了算法的时间复杂度。

优化求解的基本过程如下:初始所有可能解均未曾被访问,从某可能解出发,然后依次从其余未被访问的可能解出发深度优先遍历,同时进行剪枝,直至所有可能解都被访问为止。若此时尚有未被访问的解,则另选未曾访问的可能解为起始点,重复上述过程,直至所有可能解都被访问,最终得到最优解。

4 协同治理投融资策略

4.1 多方参与治理

确定治理方案后,应解决治理投资的问题。在实际治理案例中,存在以下问题。

(1)园区用户认为电力公司应提供优质供电,不应造成生产中断;但电力公司认为其供电满足市电供电要求,拒绝免费为用户提供优质供电。双方常诉诸政府机构,政府承担招商引资压力,不得不参与到优质供电方案中。

(2)园区中有多家企业,需要分摊协同治理的费用。但各企业的设备、生产特点、因电压暂降导致的经济损失不同,难以平摊治理费用。因此,需要一套合理的费用分摊方案,吸引用户进行协同治理。

(3)协同治理初始投入费用较高,园区用户因流动资金有限,可以采用借贷、融资等第三方介入的方式解决初始投资问题。

上述问题决定了园区电压暂降协同治理问题是

一个多方参与的投资问题,参与方主要包括以下三者。

(1)政府(园区管委会)。

政府通过成立园区管委会,对园区进行管理和运行。当园区内敏感用户因电压暂降问题损失严重时,不仅会影响园区后续的招商引资,还会影响政府的税收和城市营商环境指数。因此,应以政府税收增加为影响因子,确定政府参与度。

(2)用户。

用户因电压暂降导致生产中断和经济损失,治理愿望强烈。采用协同治理的治理成本远小于用户单独安装补偿类治理装置。用户对协同治理方式的参与度和积极性较高,作为治理效果受益方,用户理应承担治理成本的主要承担方。

(3)第三方。

协同治理作为一项投资-回报高的商业行为,在用户流动资金有限的情况下,能吸引金融机构等第三方参与投资。例如,银行可以向项目发放贷款,通过收取利息获利;保险公司也可通过对风险进行承保,获取保费。其他金融机构均可通过一定的金融方式参与,并获得相应的利润。可观利润驱动第三方参与园区电压暂降协同治理。

多方参与、协作治理的合作模式是典型的公私合营 PPP(Public Private Partnership)模式。PPP 模式旨在引入民间资本,缓解政府资金压力,提高项目开发效率,为企业创造良好的经营环境,实现多赢,因此受到广泛的青睐。PPP 模式因其在资金和效率上的优势,已广泛应用于自然资源开发、电厂、公路等领域。

园区级-设备级协同治理具有公共基础性、资金投入量大等特点,本文提出一种考虑两方博弈下合理分摊成本的 PPP 模式,解决协同治理的投资问题。PPP 模式示意图如图 4 所示。

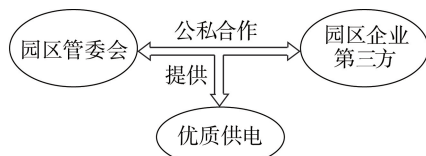


图4 协同治理的PPP模式示意图

Fig.4 PPP mode diagram of cooperative governance

4.2 考虑博弈关系下合理分摊成本的PPP模式

PPP 模式下,参与主体园区管委会和用户在资金投入问题上存在博弈关系。在与园区管委会进行博弈时,可以将园区内的所有用户看作一个整体进行博弈。用户与用户之间也存在着成本分摊问题,同时还要保证各自的经济性,投融资才能得以进行,即用户之间也存在着博弈。首先对参与者的效用进行分析,然后依次分析博弈关系。

(1)参与人效用分析。

协同治理的总成本为 M ,其中园区管委会投入的成本为 Z ,其余部分由园区用户共同承担;园区用户进行协同治理后,减少的总损失为 F 。园区参与协同治理得到的效益包括经济效益 R_m 与非经济效益 R_s ,分别如式(13)和式(14)所示。其中经济效益来自于税收的增加,与用户减少的损失有关。用户因电力供应造成的损失越少,城市投资环境与营商环境指数越高,决定了协同治理的经济效益与非经济效益具有可传递性。

$$R_m = \alpha F \quad (13)$$

$$R_s = \beta R_m \quad (14)$$

其中, α 为税率; β 为园区采取协同治理后经济效益对非经济效益的贡献系数。从而可以得到园区管委会的效用函数表达式为:

$$U_p = R_s + R_m - Z = R_s + R_m - x_1 M \quad (15)$$

用户的效用函数表达式为:

$$U_d = F - (M - Z) = F - x_2 M \quad (16)$$

其中, x_1, x_2 分别为园区管委会、园区用户的投资分摊比例,取值范围均为 $(0, 1)$ 。

(2)园区管委会和用户合作博弈。

园区管委会和用户按不同的比例投资,双方的投资都应满足各自的利益诉求。任何一方的投资比例过高或者过低,都会导致双方收益失衡。双方在投资的过程中是合作关系,但在利益诉求环节是竞争关系。这个问题可以视作双方收益的讨价还价合作博弈问题。

本文采用纳什谈判法求解该问题。考虑双方的谈判议价能力,以双方收益的纳什积为目标,确定双方的投资比例,优化目标函数、约束条件见式(17)。

$$\begin{cases} \max_x \{ (U_p(x_1) - U_p(x_{10}))^{\gamma_1} (U_d(x_2) - U_d(x_{20}))^{\gamma_2} \} \\ \text{s.t. } \Delta U_p \geq 0, \Delta U_d \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ 为投资比例向量,其中园区管委会的投资比例受政府政策的影响,有最高投资限制,本文假定 $x_1 \leq 20\%$; γ_1 和 γ_2 分别为园区管委会和园区用户的谈判力因子,满足 $0 \leq \gamma_1, \gamma_2 \leq 1$ 并且 $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$; $\Delta U_p = U_p(x_1) - U_p(x_{10})$; $\Delta U_d = U_d(x_2) - U_d(x_{20})$; $(U_p(x_{10}), (U_d(x_{20})))$ 为双方的最低合作收益期望,即谈判破裂点。不等式约束代表双方在进行讨价还价时,需保证博弈双方净收益都有所增加,或至少一方的净收益有所增加,而另一方的净收益不受损害。

从数学角度来看,该模型的约束条件全为线性,只有目标函数为非线性,可用内点法进行快速求解。

(3)用户之间的成本分摊。

园区内各用户需进行成本分摊。用户之间既是合作关系,也存在竞争关系。每个用户需满足自身的经济性需求,才会愿意进行投资。因此可建立成

本分摊模型如下:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N_k} x_{kc} = 1 \\ \text{s.t. } x_{kc} m \leq F_k \end{cases} \quad (18)$$

$$m = M - Z \quad (19)$$

其中, x_{kc} 为用户 k 需要承担的成本费用比例; F_k 为进行优质供电后, 用户 k 减少的损失; m 为用户需要承担的总成本。

结合式(18), 当 x_{kc} 按用户参加协同治理而减少的总经济损失的比例关系计算, 能保证各用户的投资收益比 Y 相等, 此时各用户均能实现可观投资效果, 且保证了用户能公平参与协同治理, 提高了用户的参与意愿。其中, 用户 k 的投资收益比计算式为:

$$Y_k = (F_k - x_{kc} m) / (x_{kc} m) \quad (20)$$

若个别用户分摊的成本过高, 可以引入第三方投资, 如通过银行贷款等方式。

5 算例分析

5.1 历史数据与相关参数

本文对西南地区某工业园区进行实例分析, 论证本文所提协同治理优化方案及其投融资策略的可行性和有效性。该园区包含5家不同类型的用户, 用 $E_1 \sim E_5$ 分别表示制药厂、造纸厂、化工厂、纺织厂、半导体厂。其生产过程受电压暂降影响严重, 园区每年因电压暂降事故所造成的经济损失高达数千万元。对该园区进行实地调查统计及分析, 相关信息见附录中表A1。

通过调研可知相关治理费用成本。园区级治理装置选择SSTS, 初始费用 $C_1 = 200$ 万元, 其维护成本一般为初始费用的5%~10%, 本文考虑高可靠性要求, 选择维护成本为初始费用的10%。运维成本具有时间价值, 根据式(1)对其进行折算(折现率 $i = 6\%$)。寿命期限 $n_1 = 10$ a。铺设单位距离电缆的成本 $c_3 = 0.7924$ 万元/m。DVR具有运行成本低、功率密度较高、响应速度快等优点, 因此算例中设备级治理装置选择DVR, 其单位容量成本与容量的函数关系如图3所示, DVR的配件成本 $c_4 = 0.12$ 万元/台。经过考察, 5个用户的配电房到园区DVR柜体的距离分别为0.6、0.5、0.65、0.7、0.5 km。园区对企业收取的税率选定 $\alpha = 7\%$, 园区采取协同治理后经济效益对非经济效益的贡献系数 $\beta = 0.5$ 。假设园区管委会的谈判力因子 γ_1 、园区用户的谈判力因子 γ_2 分别为0.45、0.55。园区用户典型敏感设备的相关信息见附录中表A2。

5.2 协同治理优化方案

假设电网的供电水平不发生较大的变化, 采用园区级治理装置后, 10 a内该园区因电压暂降减少

的损失共计19477.14万元, 远大于园区级治理装置的总成本, 则取 $k_1 = 1$, 园区采取协同治理方案。

采用3.3节所述优化方法求解模型, 优化配置方案见图5。根据此方案, 10 a内园区整体的最大净收益为24389.27万元, 协同治理成本为1045.05万元。

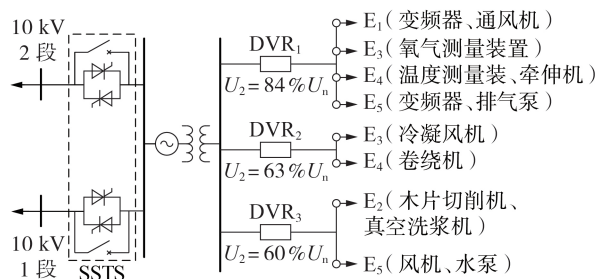


图5 协同治理优化分级方案

Fig.5 Optimization classification scheme of cooperative governance

设备级治理方案配置了3台DVR, 即将敏感设备分成3组进行治理, 对应的电压等级分别为 $U_1 = 84\% U_n$ 、 $U_2 = 63\% U_n$ 、 $U_3 = 60\% U_n$, DVR的容量分别为665.28、206.01、720 kV·A。

3台DVR的协同工作过程如下: 当发生的电压暂降电压幅值不低于额定电压的84%时, 3台DVR所保护的敏感设备均不受到影响, 3台DVR均处于旁路状态; 当发生的电压暂降电压幅值不低于额定电压的63%且低于84%时, DVR₁投入运行, 对所保护的敏感设备进行补偿, 此时DVR₂和DVR₃处于旁路状态; 当发生的电压暂降电压幅值不低于额定电压的60%且低于63%时, DVR₁和DVR₂投入运行, 对所保护的敏感设备进行补偿, 此时DVR₃处于旁路状态; 当发生的电压暂降电压幅值低于额定电压的60%时, 3台DVR所保护的敏感设备均将受到影响, 3台DVR均投入动作, 处于补偿状态。

为了证明本文所提方案的优越性, 将其与2种传统方案进行对比, 结果如表1所示。由表1可知, 2种传统方案的净收益均小于本文所提方案得到的净收益, 本文所提方案具有更高的经济性。

表1 经济性比较

Table 1 Economic comparison

方案	DVR 数量	SSTS 数量	成本/ 万元	净收益/ 万元
本文方案	3	1	1045.05	24389.27
传统方案1	1	1	1357.91	24076.41
传统方案2	1	0	3243.20	22191.12

5.3 协同治理投融资策略结果

园区管委会与用户群体博弈模型的求解方法选用内点法, 可在MATLAB平台实现快速求解。

根据算例中的数据可得到双方效用函数的具体表达式。选取谈判破裂点, 该算例设置当实施协同

治理后某方的收益低于0时,谈判破裂。考虑约束条件,即双方均须投入资金,进行求解。得到2个主体的最优投资比例为: $x_1=9.8\%$, $x_2=90.2\%$ 。则用户需要承担的总费用为942.64万元。

用户之间通过成本分摊模型进行分摊比例计算。按照用户减少的因电压暂降造成的总经济损失比例关系,在满足式(18)的条件下,计算得到分摊比例 $x_{1c}-x_{5c}$ 分别为0.39%、17.02%、7.76%、20.31%、54.52%;用户 E_1-E_5 承担的成本分别为3.68、160.43、73.15、191.45、513.93万元;各用户的投资收益比 Y 相等,其值为25.98。

通过上述计算可得到考虑双方博弈进行成本分摊的PPP模式的具体结果。

5.4 引入第三方参与的投融资分析

用户 E_5 需要单独承担一半以上的协同治理成本,资金数额大,考虑用户公司可能存在短期流动资金不足的问题,引入第三方资金辅助参与协同治理。该算例选取通过银行贷款的方式解决 E_5 的投资问题,贷款利率如表2所示。表中, n_2 为贷款年限。

表2 贷款利率
Table 2 Loan interest rate

n_2/a	利率/%	n_2/a	利率/%
$n_2 \leq 1$	4.35	$n_2 > 5$	4.90
$1 < n_2 \leq 5$	4.75		

用户可选择的还款方式有多种,本文以每年年末等额偿还为例,则每年还款总额 q 的计算式为:

$$q = [m_k I (I + 1)^{n_2}] / [(I + 1)^{n_2} - 1] \quad (21)$$

其中, m_k 为用户 k 参与协同治理的投资现值; I 为利率。经计算, E_5 以10a为贷款年限,每年需还款66.23万元,10a内共还本息662.3万元,折算为现值约为487.45万元,投资收益比 $Y=27.45$,相较于一次性投资,选择贷款更加经济。可见,通过贷款融资可有效减少用户短期的经济负担,同时满足用户治理的期望,在实际工程中具有明显的实用性。

6 结论

(1)针对园区内敏感设备耐受能力各异的情况,提出考虑园区级-设备级协同治理的敏感设备分组方法。

(2)考虑园区级/设备级治理装置的购置、运维、安装等成本,以园区净收益最大为目标,满足经济性、分级电压等约束,建立协同治理优化模型,明确协同治理方案。

(3)提出参与人效用分析模型、合作博弈优化目标,基于讨价还价博弈理论,提出考虑各方博弈下成本分摊的PPP模式,计算各参与方的投资比例、投资收益比,有效解决了协同治理方案的投融资问题。

(4)应用所提方法对西南地区某工业园区进行实例分析,结果验证了所提协同治理优化方案及其投融资策略的可行性、有效性。本文研究作为推动各方参与的电压暂降市场化解决方案提供了思路。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李春海,李华强,刘勃江. 基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):136-142.
LI Chunhai, LI Huaqiang, LIU Bojiang. Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sags[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.
- [2] 马愿谦,肖先勇,黄勇. 考虑敏感设备“以旧换新”增值服务的定价策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):164-172.
MA Yuanqian, XIAO Xianyong, HUANG Yong. Pricing strategy considering “trade-in” value-added service of sensitive equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 164-172.
- [3] 姜飞,涂春鸣,熊龙珠,等. 新型动态电压恢复器对短路故障电流主动调节的研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):139-145.
JIANG Fei, TU Chunming, XIONG Longzhu, et al. Active short circuit current adjustment by modified dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 139-145.
- [4] 王有云,马保慧,张厚楷,等. 低压动态电压恢复器2种滤波器结构的比较与分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):168-174,182.
WANG Youyun, MA Baohui, ZHANG Houkai, et al. Comparison and analysis of two filter structures for low-voltage dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 168-174, 182.
- [5] 汪全涛,姚蜀军,韩民晓,等. 双路供电固体静态切换开关控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):67-70.
WANG Quantao, YAO Shujun, HAN Minxiao, et al. Solid static transfer switching for duplex feeding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 67-70.
- [6] 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.
- [7] 李江龙,王丽,陈文波. 基于直流供电技术的电压暂降保护系统研究[J]. 电源学报,2015,13(5):105-111.
LI Jianglong, WANG Li, CHEN Wenbo. Research on voltage sag protection based on DC power supply technology[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(5): 105-111.
- [8] COLLINS E R, ZAPARDIEL F. An experimental assessment of AC contactor behavior during voltage sags[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Guimaraes, Portugal: IEEE, 1997: 439-444.
- [9] HARDI S, DAUT I. Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sags[C]//2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). Shah Alam, Selangor, Malaysia: IEEE, 2010: 396-401.
- [10] SHAREEF H, MARZUKI N, MOHAMED A, et al. Experimental investigation of AC contactor ride through capability during voltage sag[C]//2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Prague, Czech Republic: IEEE, 2010: 325-328.

- [11] DJOKIC S Z, MILANOVIC J V, KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [12] 徐永海, 洪旺松, 兰巧倩. 电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 92-97, 135.
XU Yonghai, HONG Wangsong, LAN Qiaoqian. Influence analysis of point-on-wave of voltage sag initiation and sag phase jump on alternating current contactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 92-97, 135.
- [13] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [14] BOLLEN M H J, ZHANG L D. Analysis of voltage tolerance of AC adjustable-speed drives for three-phase balanced and unbalanced sags[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 904-910.
- [15] 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.
- [16] 吴亚盆, 刘颖英, 徐永海. 可编程控制器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1422-1430.
WU Yapen, LIU Yingying, XU Yonghai. Experimental research on PLCs sensitivity during voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1422-1430.
- [17] 周彬倩. 10 kV 电源切换装置及其固态切换开关研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
ZHOU Binqian. 10 kV power switching devices and solid state switch[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] BOLLEN M H J. 理解电能质量问题: 电压暂降与短时中断[M]. 肖先勇, 汪颖, 译. 北京: 中国电力出版社, 2016: 203-256.
- [19] 徐永海, 李晨懿, 汪坤, 等. 低压变频器对电网电压暂降耐受特性及兼容性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2216-2229.
XU Yonghai, LI Chenyi, WANG Kun, et al. Compatibility between low voltage variable-frequency drives and voltage sags in distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2216-2229.
- [20] 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: 电力用户的经济性方法: GB/Z 32880.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

作者简介:



肖先勇

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电(E-mail: xiaoxianyong@163.com);

赵禾畦(1995—),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量与优质供电(E-mail: 451781613@qq.com);

李成鑫(1976—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力市场与电能质量(E-mail: lcx36@126.com)。

(编辑 陆丹)

Optimal cooperative governance scheme of park-level and equipment-level voltage sag and its investment and financing strategy

XIAO Xianyong, ZHAO Heqi, LI Chengxin

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Industrial users are affected by voltage sags in the production process and bear huge economic losses, so they have a strong demand for voltage sag governance. In order to solve the voltage sag problem economically and efficiently, an optimal cooperative governance scheme of park-level and equipment-level voltage sag and its investment and financing strategy are proposed. Considering the technical index characteristics of governance devices and according to the tolerance time of users' sensitive equipment, the sensitive equipment is grouped into two groups, which are governed with park-level and equipment-level respectively. According to the tolerance voltage of sensitive equipment, the equipment-level governance is grouped again to achieve multi-level governance. Considering the purchasing cost, operation and maintenance cost and installation cost of park-level and equipment-level governance devices, the optimal cooperative governance model of park-level and equipment-level voltage sag is established with the maximum net income of the park as its objective with meeting the constraints of grouping voltage, capacity, and so on. A PPP (Public Private Partnership) mode considering game relationship and reasonable cost allocation is proposed as the investment and financing strategy, which clearly divides the cost allocation proportion of park management committee and users, and achieves the equal investment return ratio of each participant. The example of an industrial park in Southwest China is analyzed and the results show that the proposed optimal cooperative governance scheme of park-level and equipment-level voltage sag is economic and feasible, which can provide ideas for promoting the market-oriented solutions of voltage sags involving all parties.

Key words: park-level and equipment-level; power quality; cooperative governance; voltage sag; investment and financing strategy

附 录

表 A1 5 个用户的相关信息
Table A1 Related information of 5 users

用户	园区级设备治理年平均减少损失/万元	年平均过程中断次数	单次中断损失/万元
E ₁	8.25	5	2.75
E ₂	470.4	7	84
E ₃	134	4	67
E ₄	526.5	9	78
E ₅	1507.2	12	157

表 A2 敏感设备的信息
Table A2 Information of typical sensitive equipment

用户	敏感设备	耐受电压/%	耐受时间/ms	额定容量/(kV·A)	数量/台
E ₁	变频器	80	16	18	3
	通风机	75	18	160	3
E ₂	木片切削机	54	18	100	2
	真空洗浆机	60	15	180	3
E ₃	氧气测量装置	78	5	12	2
	冷凝风机	63	15	90	3
E ₄	温度测量装置	84	8	20	1
	牵伸机	83	15	18	2
	卷绕机	56	12	19	3
	变频器	80	15	22	1
E ₅	风机	60	19	150	2
	水泵	45	10	80	2
	排气泵	82	17	52	3

注：5 个用户共有 30 台耐受时间低于 20 ms 的敏感设备。