

极端天气下电力系统风险管理及弹性提升的市场化机制设计

徐铭乾, 李更丰, 别朝红, 邹文秋, 李明昊, 卞艺衡

(电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 陕西省西安市 710049)

摘要: 提升电力系统弹性对保证电力系统在自然灾害条件下的安全稳定运行意义重大。设计相应的市场化机制是提升电力系统弹性、激励电力资源投资的重要方式。为此,文中提出了电力系统弹性提升的市场化机制框架,并给出了弹性保险、灾前电力期货市场的详细定义及模式。然后,引入保险理论建立弹性保险模型,并提出了灾前电力期货市场模型。进一步,对弹性保险模型进行算例分析,分析结果表明所提出的市场化机制可以在实现保险公司净利润最大化的同时提升电力系统弹性。最后,给出了电力系统弹性与经济性平衡的初步规律。

关键词: 电力系统; 弹性; 极端天气; 电力市场; 保险; 电力期货市场

0 引言

“双碳”目标下,电力系统在极端天气下的运行风险不断增大,提升电力系统的弹性迫在眉睫^[1]。但提升电力系统弹性需要投入大量成本,为引导政府、电力公司、用户参与建设并激励资本投入,需考虑用于弹性提升的资金流动方案^[2]。此外,灾后场景下,用户无序用电可能导致电力现货市场价格飙升^[3]。因此,提升电力系统弹性的市场化机制亟待深入研究。

在灾后场景中,电力供应短缺将导致用户无序用电,电价飙升。美国得州2021年停电事故表明,由于电力系统可靠性不足,极端天气下电力用户需求攀升,现货市场价格增速提高导致结算点电价飙升,最终达到切负荷价值上限^[4-6]。美国加州2020年轮流停电事故中,日前市场的实际电力需求被低估,加之集中竞价掩盖了供应紧张的情况,使得加州独立系统运营商(California independent system operator, CAISO)高估了当天的电能供应,加剧了电力供需不平衡^[7-8]。在极端天气的影响下,传统电力现货市场需要同时面对电力中断、需求增加、无序用电等情况,而日前市场难以预测灾害突发时用户实际的需求情况。面对此种场景,亟须设计面向灾后备电需求较高的用户并区别于传统电力现货市场的市场化机制。

在电力市场中引入需求响应可以使需求侧更加

积极有效地参与电力市场,是适应新型电力系统发展的必然趋势^[9-11]。需求响应有效减小了电价波动风险,可促进资源优化配置。但在电力系统面对极端事件并出现较大容量短缺时,传统的需求响应在较短时间尺度内完成负荷削减及资源调配十分困难。为解决该问题,已有部分研究提出应对方案。文献[12-14]考虑在中长期时间尺度下对可中断负荷进行管理,在保证用电安全的前提下,通过需求响应实现削减负荷、降低运行成本的目标。该方案仅针对可中断负荷设计,未细致考虑此类负荷所能容忍的最大中断时长,也未考虑不可中断负荷在极端事件场景下增长的用电需求。文献[15-17]提出了在极端事件预警阶段协调各类分布式资源参与需求响应的方法,以提升关键负荷恢复力。然而,极端事件预警阶段与灾后阶段的时间界限并不明确,在短时间内迅速集结大量分布式资源的可行性有待验证。

针对此类问题,部分研究将极端场景下电力系统的安全运行风险转移至保险公司或其他市场主体。文献[18-19]提出了将可靠性措施成本转化为经济当量的思路,探索了可靠性与经济性关联的方法。文献[20-25]考虑用户在极端场景下规避电力市场风险的需求,将保险理论引入需求侧风险管理中以实现容量市场的合理配置。上述文献均探讨了电力系统经济性与可靠性之间的平衡问题,但未考虑极端场景下的弹性提升问题。目前,仅针对电力系统可靠性设计市场化机制已难以满足电力系统稳定运行的更高要求。

为此,结合现有研究,围绕电力系统弹性提升的

收稿日期: 2024-04-28; 修回日期: 2024-08-23。

上网日期: 2024-09-29。

国家自然科学基金资助项目(52222705)。

市场化机制框架,提出弹性保险、灾前电力期货市场的定义及措施;并基于保险理论初步探索了电力系统弹性与经济性平衡的规律。最后,对电力系统弹性提升的市场化机制设计进行了展望,以期为中国电力市场机制设计提供参考。

1 电力系统弹性提升的市场化机制框架

1.1 设计思路

国内外围绕弹性电力系统及其恢复力已开展较多研究^[26-30]。然而,在电力容量不足的场景下,工商业用户无序用电导致电价飙升,出现了电力资源分配不合理的情况。文献[31-33]在需求侧响应中考虑了灾后用户有限理性及调节能力有限的问题。但随着电力系统复杂性日益增加,用户多元性愈发明显,电力市场风险增大、电力用户无序用电等问题难以得到有效解决。

在市场调节能力较小的电力系统中,通过应急抢修实现全系统的完全恢复难以保证恢复效率。如果亟须恢复供电的用户和无须立即恢复供电的用户处于同一保供优先级,则前者需求难以得到及时解决,造成重大损失的风险也会随着停电时间延长而增大^[34-35]。

与此同时,电力系统恢复力的提升着眼于应对“小概率-高风险”的极端事件,从有限的时间尺度来看,其收益与投入或难以持平,如何对其停电经济损失以及投资建设成本进行有效量化,同样成为不可忽视的问题^[36]。

实际上,用于建设弹性电力系统的成本是有限的。为此,本文引入保险理论设计了电力系统的弹性提升方案,并提出了灾前电力期货市场的概念。所提出的提升电力系统弹性的市场化机制框架如图1所示。

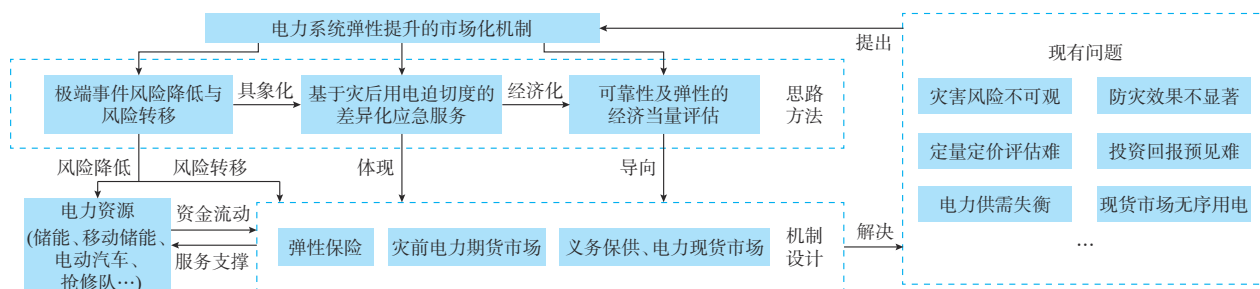


图1 电力系统弹性提升的市场化机制框架

Fig. 1 Marketization mechanism framework for resilience enhancement of power system

1.2 电力系统弹性提升的市场化机制定义

具有恢复力的电力系统被称为“弹性电力系统”^[26]。电力系统弹性提升的市场化机制可定义为:为维护电力系统在遭遇极端事件后安全稳定运行,保证持续供电,除正常电能生产、输送、使用外,由发电企业、电网经营企业和电力用户提供的保证无故障线路或网架正常运行的一系列市场化手段。目前学术界并未围绕电力系统弹性提升的市场化机制进行系统化的定义。传统的电力市场辅助服务^[37]更多地与电力系统稳定性相关,着眼于调频^[38-40]、调峰^[41-42]、备用^[43-44]等功能,而电力系统弹性提升的市场化机制则更侧重于电力系统恢复力的提升,服务场景主要为极端事件发生前后。

用于电力系统弹性提升的可调度电力及人力资源包含电力系统备用容量、储能系统^[45](energy storage system, ESS)、移动储能系统^[46](mobile energy storage system, MESS)、应急电源、抢修队等资源。所需资金的来源包括政府补贴、弹性保险年金、灾前电力期货市场、电力现货市场、资本市场一次投入成本等。市场化机制的服务对象可包含所有

电力用户,根据电力用户灾后需求的不同进行分级,为其定制差异化服务。

1.3 电力系统弹性的风险和经济性分析

1.3.1 极端事件风险管理方案

2022年6月19日,国家减灾委员会印发《“十四五”国家综合防灾减灾规划》,文件指出应当探索“产品+服务+保险”等新型应用模式,引导各类市场主体参与先进技术装备的工程化应用以及产业化发展^[47]。极端事件具备“小概率-高风险”的特点,电力系统遭遇极端事件可能存在灾害风险不可观、防灾效果不显著、定量定价评估难、投资回报预见难等问题。

因此,极端事件风险管理与保险理论相结合,用以解决此类问题十分必要。文献[48]提出了考虑危险性、风险暴露、脆弱性、防灾减灾能力这4种灾害风险要素的综合管理模式。现阶段大多数政府机构、防灾减灾中心多以提升防灾减灾能力为导向进行投资及建设。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在提出的应对极端气候事件减灾对策中认

为,“风险转移与风险承担”和“准备、应对和恢复”同样重要^[49]。就国内外各大城市应对极端事件的实践经验而言,灾前准备、应对和恢复是技术及管理手段发展较为成熟的方面,而风险转移及风险承担等市场机制的设计相对较少。

保险行业一般称极端事件为巨灾,其具备低频率、高损失、难以预测、风险暴露单位高度相关等特征,巨灾风险的转移可以通过事先的财务安排,将灾后可能产生的经济损失转移给保险市场^[50]。文献[51]针对电力系统网络安全,采用保险精算原理对各输电公司所需缴纳的保费进行计算,以激励各输电公司进行投保。文献[52]设计了考虑电力系统网络安全威胁的电力系统可靠性保险精算框架;文献[53]在该文基础上,基于电力系统信息物理系统的脆弱性进行可靠性分析,进而计算联合网络保费。文献[54]提出了一种基于保险理论的配电网巨灾风险管理方法,通过评估巨灾潜在损失及风险管理效果对保险进行定价。对极端事件进行风险管理主要有灾前风险降低、灾后风险转移2种方法。

1)灾前风险降低:在灾害来临或容量预警阶段,电力公司投入一定成本对电力资源进行配置、调度,以实现电量不足或供电中断造成的灾后损失最小化。

2)灾后风险转移:通过事先的财务安排,将电力系统遭受巨灾后可能产生的经济损失转移给保险市场、再保险市场以及资本市场等。

电力公司是否具备向停电用户进行赔偿的义务,是决定弹性保险机制设计合理性的关键。随着储能系统等灵活性分布式资源的发展以及电力市场规则的完善,电力公司在极端场景遭遇容量不足及线路中断等情况时积极参与供电恢复是应履行的义务。若电力公司对停电不负有经济责任,则将导致电力公司缺乏提升电力系统弹性的动力。为了提高电力公司提升电力系统弹性的积极性,可以用经济性的指标衡量极端场景的停电风险,借助市场化手段进行激励或惩罚,以期设计合理的弹性保险品种;对用户而言,在极端场景后遭受超出预期的停电损失时也可获得弹性保险的赔偿。因此,弹性保险机制设计问题须综合考虑保险理论及经济博弈论相关原理进行解决。

1.3.2 电力系统弹性与经济性分析

加强弹性电力系统建设能有效降低被动性的减灾投入以及停电损失,是提高电力投资效益的必然要求^[55]。然而,电力系统弹性的提升往往以大量的投资为代价。仅为应对极端事件,提升电力系统弹性、增添容量冗余的相关投资在电力系统稳定运行

阶段内又难以得到可观收益^[56]。因此,有必要设计相应的市场机制以缓解电力系统弹性与经济性之间的矛盾。

与此同时,极端场景下电力系统出现大规模故障时,海量的故障数据和有限的电力资源给抢修调度决策带来了新的挑战。因此,需要对电力用户及相关电力资源依据灾后用电迫切程度、调度成本等因素进行差异化分级^[57]。借由差异化措施优化极端场景下的电力资源调度配置,以解决电力供需失衡、现货市场无序用电等问题。相应地,用户用于提升电力系统弹性的相应支出也应该更高效地用于应急电力资源配置。

1.3.3 可靠性经济衡量体系

在竞争的电力市场中,由于电力公司、电力用户、监管机构等分属于不同的市场主体,其对电力系统可靠性存在着差异化的认识。而目前普遍采用的相关可靠性指标,如电力不足期望值(loss of load expectation, LOLE)、期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS)等,难以客观衡量不同地区和系统达到相同指标所需投入的经济成本。传统电力系统优先保证安全性,再满足经济性,但不同电力系统存在各自的具体情况,发电成本、用户效益、电力系统构成、机组状况、气候及典型灾害等因素均不尽相同,从而导致其可靠性提升成本及可靠性提升带来的经济效益存在差异^[18-19]。电力系统弹性提升的建设需激励资本市场进行投资,但传统的可靠性指标经济可观性较差,难以激励投资者对于电力系统弹性提升的投资兴趣,需要使用弹性评估的经济体系^[36]。

采用电力系统弹性的经济当量进行评估将有利于计算投资某种弹性电力系统建设方案前后的弹性等效收益,而弹性等效收益实质则为灾后减少的停电损失。因此,为便于衡量弹性经济当量,可直接将单位时间(可为若干年)内停电经济损失减少量作为衡量电力系统弹性提升的经济性指标。基于此种方法,弹性等效收益可以直接采用灾害经济损失减少量进行表示:

$$E_{k,o,q} = L_{k,o} - L_{k,q} \quad (1)$$

式中: $E_{k,o,q}$ 为第 k 个灾害场景下采取弹性提升手段 o 对比手段 q 获取的等效经济收益; $L_{k,o}$ 为第 k 个灾害场景下采取弹性提升手段 o 后的停电损失期望值; $L_{k,q}$ 为第 k 个灾害场景下采取弹性提升手段 q 后的停电损失期望值。

1.4 差异化的供电服务分类

根据灾后用户的差异化用电需求,可以将常见

针对电力用户的供电服务分为以下4类:

1)“义务供”:对特定用户义务保障其电力供应。用电优先级最高,政府机关、医院、人防设施等机构在极端场景下用电需求最为迫切,电力公司需不惜一切代价保障该类用户供电。

2)“平时预”:弹性保险服务。用电优先级低于“义务供”,此类用户在灾后用电需求较高,但其迫切程度次于“义务供”相关用户,可以考虑为此类用户提供弹性保险服务。

3)“灾前防”:灾前电力期货市场。用电优先级低于“平时预”,此类用户在灾后用电需求不高,但其用电迫切程度次于“平时预”相关用户,可以对此类用户进行评估并赋予响应用户获得灾前电力期货市场的准入资格。

4)“灾后补”:电力现货市场。用电优先级低于“灾前防”,此类用户在灾后用电需求较弱,其用电迫切程度次于“灾前防”相关用户,此类用户由于用电需求最弱,灾后直接参与电力现货市场获益。

因此,设计以下差异化市场化机制:对“义务供”相关用户应当全程提供不计亏损风险的弹性提升服务;对“平时预”相关用户采用弹性保险服务模式,以避免在极端场景中直接参与灾前期货市场及电力现货市场的风险;“灾前防”用户未购买弹性保险,但具备灾前期货市场的准入资格,可以在容量预警阶段开放的灾前电力期货市场购买前2类用户所剩余的备用容量、电力资源及相关辅助服务使用权;“灾后补”相关用户不具备灾前期货市场的准入资格,在极端事件发生后根据实际需求在包含剩余备用容量的电力现货市场购买所需容量的使用权。

电力用户与电力公司在平时签订灾后服务合同,以确定其在灾后获得的服务。图2反映了用户根据灾后用电需求的差异,从电力公司获得不同服务的逻辑。其中,“义务供”用户为灾后用电优先级最高的用户,“灾后补”用户为灾后用电优先级最低的用户。相应地,“义务供”用户群体容量较小,“灾后补”用户群体容量较大。

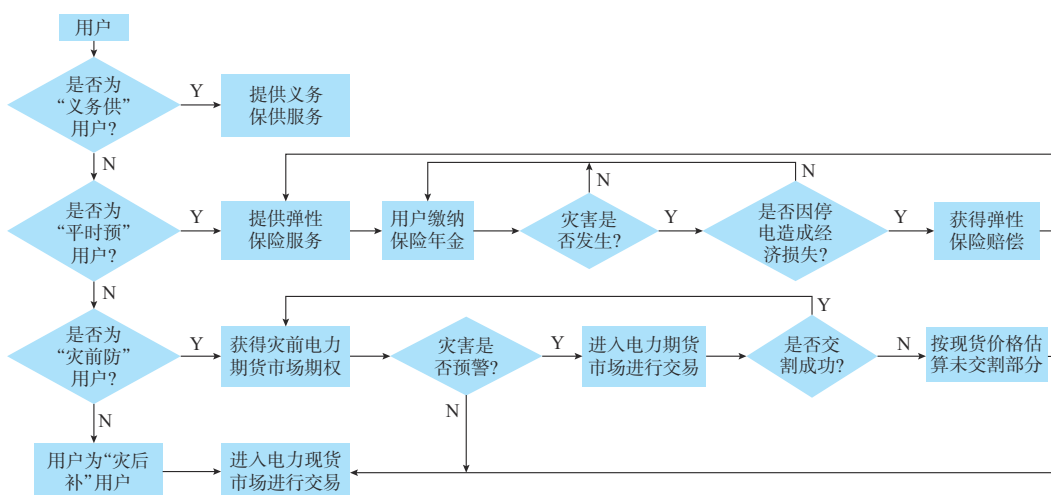


图2 用户获得差异化服务逻辑图

Fig. 2 Logic diagram for users obtaining differentiated services

2 电力系统弹性提升的市场化机制设计方案

2.1 弹性保险

弹性保险作为一种风险转移及降低的市场交易品种,可由电力公司和电力用户以外的第三方提供。区别于巨灾保险仅对灾害风险进行分散、转移,弹性保险须将一定比例的收缴保费直接投资于电力系统弹性提升建设,以降低电力系统风险。目前,已有研究将保险理论引入电力系统可靠性研究中。文献[20-25]分析了引入保险理论以提升电力系统可靠性的可行性,证明了其对于电力公司提升电力系

统可靠性的激励作用,从电力公司和用户的角度分别分析了各自通过保险获得的利益,以证明引入保险理论对于电力公司及用户双方均有利的结论。

目前,弹性保险在电力行业中仍缺少公认的定义和标准。本文参照文献[23]对于可靠性保险的定义,给出弹性保险的定义:由保险人保障被保险人的供电弹性,当在保险人承保范围内因发生不能满足投保人供电弹性要求的事而造成被保险人产生停电损失,由保险人按保险合同规定进行相应赔偿。弹性保险须满足保险三大职能的要求:经济补偿职能、防灾防损职能、融资职能。各弹性保险主体的关系示意图见附录A图A1。

基于弹性保险的定义,结合电力服务的实际情况,需要明确作为投保人、保险人、被保险人、受益人的市场主体范畴,以避免道德风险。有以下3种可行的保险模式,其示意图见附录A图A2。

1)弹性保险模式1

电力用户为投保人、被保险人、受益人;电力公司为保险人。在弹性保险模式1中,电力用户对自身的弹性进行投保,当电力用户的弹性无法满足其需求时,电力公司作为保险人需要对用户的损失履行保险合同规定的赔偿。在此保险模式下,电力公司的收益将直接与弹性相关,这将促使电力公司为实现弹性保险的预期收益而保障用户用电弹性。

2)弹性保险模式2

电力用户为投保人、被保险人、受益人;保险公司为保险人。

在弹性保险模式2中,电力用户对自身的弹性进行投保,当电力用户的弹性无法满足自身需求时,保险公司作为保险人需要对用户的损失履行保险合同的赔偿。在此保险模式下,保险公司作为第三方主体介入电力辅助服务市场以转移电力系统风险。特别地,保险公司需要对电力公司进行较强的监管并明确其承保范围,以避免电力公司故意停电协同电力用户骗取保险赔偿。

3)弹性保险模式3

电力用户为投保人、被保险人、受益人;保险公司为保险人;电力公司为再保险人。

在弹性保险模式3中,电力用户对自身的弹性进行投保,当电力用户的弹性无法满足自身需求时,保险公司作为保险人需要对用户的损失履行保险合同的赔偿。在此保险模式下,保险公司作为第三方主体介入电力辅助服务市场,并通过再保险的方式将部分保险收益用于向电力公司购买备用容量、增设储能系统以提升用户用电弹性。

在巨灾场景下,弹性保险中的保险人存在较大破产概率,需要考虑此种场景下弹性保险的可行性^[58]。保险要实现极端事件风险的可保性需遵循大数定律。大数定律指在每次独立试验中偶然性随机事件发生的次数在大量重复实验中呈现出的必然性规律。在大数定律的前提下,对于单个投保人,其无法确定极端事件发生的时间及造成的损失,而保险人则利用大多数情况下风险的相对稳定性使得风险平等地分散至每一位投保人^[59]。根据大数定律的基数约束条件,投保人必须满足保险经营的最低投保数量;其次,保险公司的运营稳定性由损失发生实际值与期望评估值的一致性所决定。

目前,中国保险主体多元化水平正逐步提升,垄断竞争型保险市场日趋成熟^[60]。同时,中国具备数以万计且日趋复杂的配电网^[61],加之近年来高科技制造业快速发展对用电质量提出了更高的要求,电力系统中潜在的弹性保险投保人数量正逐步提升,使得满足弹性保险经营的最低投保数量具备较大的可能性。此外,中国幅员辽阔,灾害的发生具备较为典型的周期性和区位特征^[62],符合时间及空间的偶然性。因此,可以针对不同区域配电网的弹性保费进行差异化的定价,并设计多类灾害险种以实现较为有效的保险管理。

本文提供一种计算投保人保险年金的方法。假设一定数量的配电网用户为规避停电风险进行投保,保险缴纳金设定为期初初付年金;保险公司赔偿方式为比例赔偿;该用户群所在配电网平均每年极端事件的停电期望时间为 $E(\tau_n)$,其中, τ_n 为第 n 年用户的停电时间。该用户群在第 n 年支付的年金 a_n 为:

$$a_n = E(L_{\text{loss},n})r_{\text{ins}}E(\tau_n)(1+i)^{n-1}M \quad (2)$$

式中: $E(L_{\text{loss},n})$ 为第 n 年用户停电1h的平均经济损失期望值; $L_{\text{loss},n}$ 为第 n 年极端事件的停电损失; r_{ins} 为保险费率; i 为保险年利率; M 为配电网用户数量。

第 n 年用于灾后恢复的电力资源容量 $p_{n,\text{inv}}$ 为:

$$p_{n,\text{inv}} = \frac{R_{n,\text{inv}}}{c_{\text{inv}}E(\tau_n)} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } R_{n,\text{inv}} \leq \bar{R}_{\text{inv}} \quad (4)$$

式中: $R_{n,\text{inv}}$ 为第 n 年用于风险降低的投资成本; c_{inv} 为电力资源单位容量成本; \bar{R}_{inv} 为电力资源投资上限。

计及用于风险降低的投入成本,第 n 年受灾用户失电率 δ_n ($\delta_n \in [0, 1]$)为:

$$\delta_n = \frac{p_n E(\delta_n) - p_{n,\text{inv}}}{p_n} \quad (5)$$

$$0 \leq p_{n,\text{inv}} \leq p_n E(\delta_n) \quad (6)$$

式中: $E(\delta_n)$ 为受灾用户在第 n 年的失电率期望值; p_n 为用户在第 n 年的平均负荷。

保险公司在第 n 年给付受灾用户失电准备金 V_n 为:

$$V_n = r_{\text{com}}E(\tau_n)\delta_n A(L_{\text{loss},n})N \quad (7)$$

式中: r_{com} 为保险公司的赔偿费率; $A(L_{\text{loss},n})$ 为第 n 年受灾用户停电1h的实际平均经济损失; N 为受灾用户数量。

保险人在第 n 年给付后获得的年总收益 R_n 为:

$$R_n = a_n - V_n \quad (8)$$

净收益中一部分为净利润,另一部分需要作为保险公司用于风险降低的投资成本,包含备用容量及储能系统等资源的购买费用。第 n 年净利润 $R_{n,net}$ 为:

$$R_{n,net} = R_n - R_{n,inv} \quad (9)$$

目标函数 f 为净利润最大:

$$f = \max R_{n,net} \quad (10)$$

第 n 年保险公司累积利润 $S_{n,net}$ 为:

$$S_{n,net} = \sum_n R_{n,net} \quad (11)$$

2.2 灾前电力期货市场

极端事件给电力现货市场的安全运营带来了风险与挑战。在极端事件发生时,用户用电需求激增,发电机组、输电线路、节点等故障率提高,系统发电容量难以满足负荷需求,现货市场电价飙升。在能源成本较高的场景下,用电迫切程度较高的小型电力用户将蒙受更大的损失。

为解决该问题,应当考虑如何合理地设计备用容量辅助服务市场。区别于传统的电力现货市场并有效规避备用容量不足的风险,可考虑建立灾前电力期货市场用于保障部分用电迫切度更高的用户用电。具备灾前电力期货市场准入资格的电力用户通过套期保值交易将灾后交易的风险转移给电力公司^[63]。与此同时,电力公司避免了灾后用电迫切度更高的用户直接进入电力现货市场进行交易的风险,也避免了电力市场在灾后运营的风险。

本文参考电力期货市场的定义^[64-65]给出灾前电力期货市场的定义:以特定的价格进行买卖,在灾后电力系统进入容量短缺状态时开始交割,并在灾后系统停电故障恢复时交割完毕,以电力期货合约形式进行交易。

灾前电力期货市场属于电力期货市场的一种,但因其场景存在一定的特殊性。具体差异如下:

1) 目的

灾前电力期货市场旨在提升电力系统弹性及电力市场安全性,解决灾后电力系统电力资源分配不合理带来的供需不平衡问题,以及电力现货市场灾后电价飙升使得高用电迫切度用户损失严重的问题。

2) 用户

具备灾前电力期货市场准入资格的用户,即“灾前防”相关用户,其灾后用电迫切程度低于“义务供”及“平时预”用户。“灾前防”用户的准入资格需要政府、电力监管等相关部门在系统化的评估后进行授权,并建立公平透明的市场监管体系和信息披露制度。

3) 服务

在“义务供”用户及“平时预”用户分配得到可能剩余的备用容量及电力资源后,灾前电力期货市场优先为具备准入资格的“灾前防”用户提供可能剩余的备用容量及电力资源的使用权。在购买可能剩余的备用容量及电力资源的使用权后,电力公司在灾后将分配可能剩余的备用容量并调度可能剩余的电力资源给“灾前防”用户。

4) 价格及成本

为合理设定该市场中的边际电价,需建立系统化的评估体系,以预估灾害来临后的区域失电量、容量缺口、电价涨幅等风险。该边际电价构成包含:发电成本、灾后电力资源调度成本、市场运营成本、投资备用容量及电力资源的成本,以及合理收益。期货市场交易开放阶段内价格受供需关系影响。

5) 交易及交割时间

灾前电力期货市场需要明确交易开放时间以规避极端事件风险。将灾害预警时间作为区域电力系统交易开放时间可能存在预警标准不统一、评估指标难以定量描述的问题。因此,可以基于电力系统指标,如失电比例、容量缺口、故障位置等指标衡量电力现货市场状态,以确定灾前期货市场交易开放区域及时间、期货交割起始及终止时间。

6) 灾前电力期货市场模型

期货交易应当在具备灾前电力期货市场准入资格的用户之间进行。假设某地在极端事件预警后开放灾前电力期货市场,具备资格的电力用户可以在该市场交易。图3所示为灾前电力期货市场价格曲线。图中: c_F 为灾前电力期货市场价格; c_S 为电力现货市场价格; c_C 为单位容量成本; t_0 至 t_7 为不同时刻。

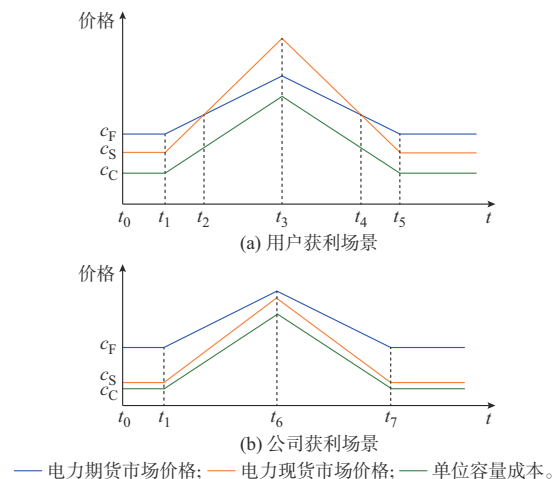


图3 灾前电力期货市场价格曲线
Fig. 3 Price curves of pre-disaster electricity futures market

图3(a)为用户获利场景。在此场景下, t_0 时刻属于常规时刻, 该时刻尚未灾害预警, 市场价格正常波动; t_1 时刻为灾前预警时刻, 此时, 期货市场及现货市场价格开始增长, 相应地, 为保证电力系统稳定运行, 单位容量成本开始增长; t_2 时刻, 期货市场价格与现货市场价格相等; t_3 时刻, 灾害结束, 供电压力减小, 市场价格下降, 单位容量成本开始降低; t_4 时刻, 期货市场与现货市场价格相等; t_5 时刻, 电价回归正常波动。

图3(b)为电力公司获利场景。在此场景下, t_0 时刻属于常规时刻, 该时刻尚未灾害预警, 市场价格正常波动; t_1 时刻为灾前预警时刻, 此时, 期货市场及现货市场价格开始增长, 相应地, 为保证电力系统稳定运行, 单位容量成本开始增长; t_6 时刻, 灾害结束, 供电压力减小, 市场价格下降, 单位容量成本开始降低; t_7 时刻, 电价回归正常波动。

由于具备期权交易资格的用户较少, 期货市场价格变化速度低于现货市场价格变化速度。电力公司与用户之间结算容量以该时刻电力市场现货价格为准。用户在购买期货前需充分评估可能产生的风险, 故期货对比现货存在一定溢价。在用户获利场景下, 灾害较为严重, 用户以期货市场价格购入容量, 以现货市场价格结算; 在电力公司获利场景下, 灾害未达预期严重程度, 用户以期货市场价格购入容量, 以现货市场价格结算, 将导致亏损。

用户参与灾前电力期货市场, 在 t_A 时刻购买期货, 在 t_B 时刻交割或卖出, 此间套利 $C_{P,A,B}$ 为:

$$C_{P,A,B} = C_{S,B} - C_{F,A} \quad (12)$$

式中: $C_{F,A}$ 为 t_A 时刻期货市场价格; $C_{S,B}$ 为 t_B 时刻现货市场价格。

通过灾前电力期货市场, 电力公司在 t_A 时刻卖出期货, 在 t_B 时刻交割或回收, 此间套利 $C_{R,A,B}$ 为:

$$C_{R,A,B} = C_{F,B} - C_{S,A} \quad (13)$$

式中: $C_{S,A}$ 为 t_A 时刻现货市场价格; $C_{F,B}$ 为 t_B 时刻期货市场价格。

在此场景下, 对于具备期权交易资格的用户而言, 其目标函数 f_u 为 t_A 到 t_B 时段参与灾前电力期货市场套利最大, 即:

$$f_u = \max C_{P,A,B} \quad (14)$$

在此场景下, 对于电力公司而言, 其目标函数 f_c 为 t_A 到 t_B 时段参与灾前电力期货市场套利最大, 即:

$$f_c = \max C_{R,A,B} \quad (15)$$

由此可见, 电力公司与用户在灾前电力期货市场之间存在博弈关系, 需要对灾害风险、市场风险等进行预估, 以确保各自获得尽可能大的套利空间。

2.3 义务保供及电力现货市场

中国现行电力管理始终坚持“安全第一, 预防为主”的方针, 建立电力系统防灾安全保障体系, 提升电力系统运行的可靠性^[66]。传统的全面供电保障过程中存在着海量的故障数据信息, 调度人员难以在短时间内确定重要负荷的用电状态。为更加高效地保障电力系统安全, 采用差异化规划的方法选取特别重要的电力用户进行供电恢复有助于提升供电恢复效率, 提高供电保障标准^[67-68]。根据此原则, 政府、医院、人防、民居等场所应当被视为“义务供”用户, 通过法律条例的形式要求相关电力公司在城市电力系统遭遇极端事件后尽最大可能地保障此类用户的供电服务。相应地, 在极端场景下“义务供”服务对比其余几类服务具备较大的社会福利, 政府需要对电力系统弹性提升服务框架中的“义务供”服务积极干预、有力激励, 以避免极端场景下提供此类服务的电力公司亏损严重、运营困难。

在该市场化机制框架下, 灾后用电迫切度最低的相关用户属于“灾后补”用户范畴, 直接通过电力现货市场购买可能剩余的备用容量, 租赁可能剩余的电力资源使用权。“灾后补”用户的用电需求完全在现货市场价格中反映。在较为极端的场景下, 电力现货市场中将不存在可购买的备用容量及可租赁的电力资源。

3 算例分析

以北美某配电网近20年的停电经济损失估值为例, 对弹性保险模型进行分析, 其相关数据如附录A表A1所示。其中, 用户受灾较为严重的年份分别为第8、15、19年。各子算例的其余相关参数设定如表1所示。算例结果如附录A表A2所示, 相关曲线如图4所示。

在灾害较为严重的年份, 用于灾后恢复的电力资源投资相应较大。在算例1、2、3中, 最大可达电力资源投资上限为10万元; 在算例4中, 最大可达电力资源投资上限为15万元, 且算例1、2、3中失电率较大的年份随着电力资源投资上限的增长可得到有效改善。

对比失电率期望可知, 在采用电力资源投资后失电率改善效果明显, 各年份失电率均有所降低, 其中, 受灾较小的年份失电率可降低至0%。保险公司需要结合预测值适当地增大电力资源投资规模; 在受灾较为严重的年份, 电力资源投资经优化均达到投资上限。

每年净利润受年金、准备金影响较大。年金设定主要取决于当年灾害经济损失期望值, 与保险公

表1 算例数值设定
Table 1 Numerical setting of cases

算例	i	r_{ins}	r_{com}	$c_{inv}/[元/(kW \cdot h)]$	$M/户$	$N/户$	$\bar{R}_{inv}/万元$	$E(L_{loss,n})/元$
算例1	0.03	0.05	1.2	10	1 000	100	10	20
算例2	0.03	0.05	2.0	10	1 000	100	10	20
算例3	0.03	0.05	1.2	10	1 000	500	10	20
算例4	0.03	0.05	1.2	10	1 000	100	15	20

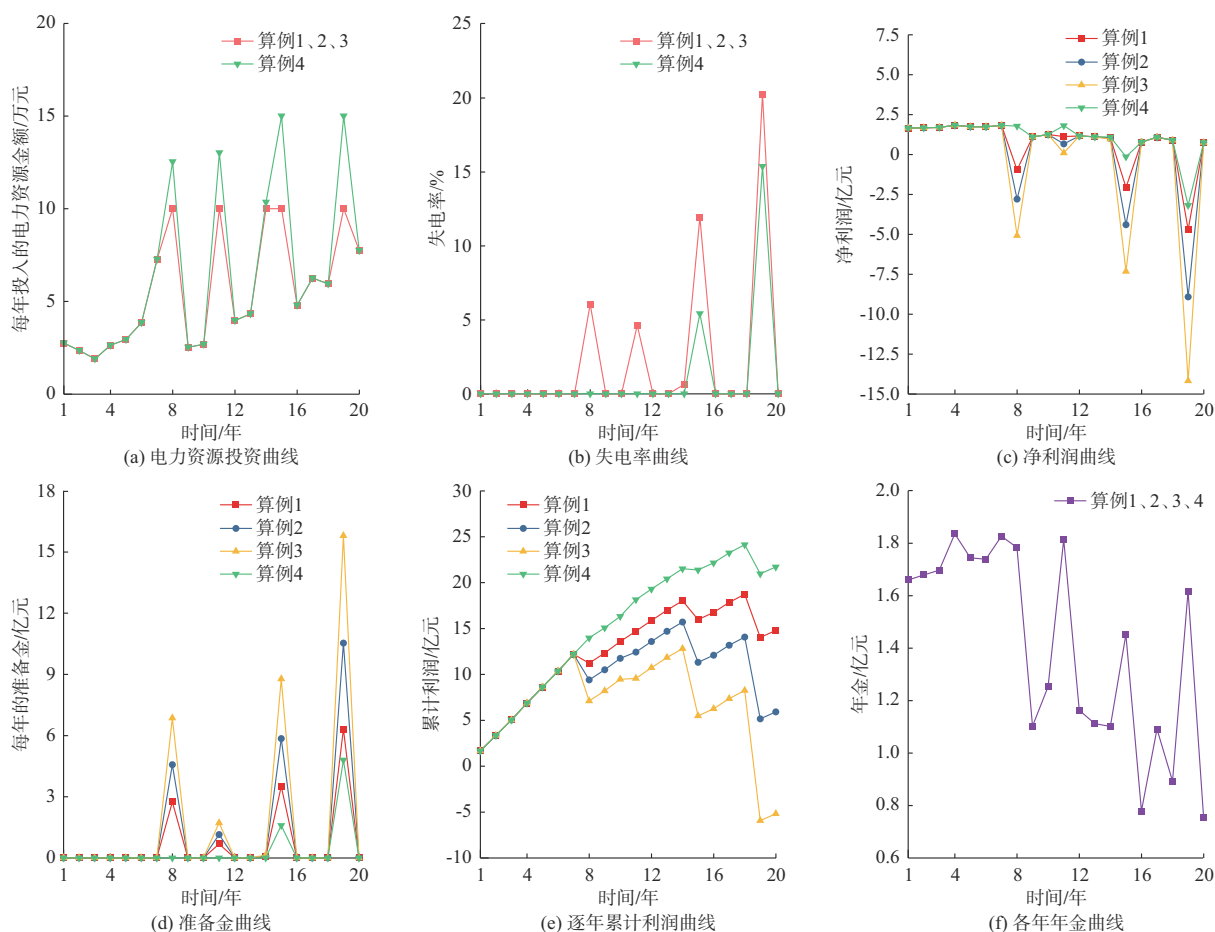


图4 算例结果
Fig. 4 Results of cases

司预测当年灾害经济损失的准确度相关。若各年停电经济损失期望值设定偏高,则用户可能放弃保险方案;若各年停电经济损失期望值设定偏低,则保险公司净利润受损。在第8、15、19年,即灾害造成经济损失较高的年份,保险公司需给付的准备金较高,亏损较为严重。

对比各算例中保险公司的逐年累计利润,其中,仅算例3出现了累计利润亏损,其受灾配电网用户数量达到了总用户数量的50%,远大于其他算例的10%。算例2的累计利润对比算例1更小,这取决于赔偿费率的设定,赔偿费率越大,保险公司累计利润越低。但赔偿费率若过低则用户购买保险服务的

意愿会不高,需要综合考虑赔偿费率的设定。在算例4中,其电力资源投资上限最高,虽然灾害严重的年份电力资源投资成本较高,但需用于赔付的准备金较少,保险公司累计利润更大。

算例结果证明了弹性保险模型的可行性。在实际工程应用中,为保证合理收益,应综合考虑可能的灾害级别、失电率期望值、用户规模、受灾比例等因素,设置合理的保险费率、赔偿费率、电力资源投资上限。本模型场景设计较为简易,在后续研究中可考虑与实际灾害电力系统重构场景吻合以模拟实际停电经济损失,引入气象预测等方法预估各年停电经济损失期望值及期望停电时长,配置多元用户级

别以精确计算各年准备金。

4 结语

针对当前电力系统弹性提升缺乏市场化机制的问题,本文提出了弹性保险、灾前电力期货市场、义务保供、电力现货市场并行的市场化机制框架,建立了弹性保险模型。所提机制能够以净利润最大化为目标实现弹性提升,主要结论如下:

1)基于电力系统弹性提升的市场机制框架,结合灾后用户用电迫切程度对市场化机制相关服务类型进行了分类,可以改善灾后场景下电力系统供需不平衡及用户无序用电的情况。

2)本文提出的弹性保险模型能够有效降低用户面临极端事件的停电风险。该模型以净利润最大化为目标函数,结合保险理论,将用户因失电情况所获得的赔付设定为保险公司的惩罚,有效实现了降低失电率的目标。

3)基于保险理论初探了电力系统弹性与经济性平衡的规律,为保险公司提供了面向电力系统弹性提升的保险方案;基于合理的年金、赔偿费率、电力资源投资方案设计,有助于提升保险公司的净利润,降低亏损风险。

随着电力市场化改革进入快车道,弹性电力系统的建设可基于市场化的措施推进。目前,电力系统弹性提升服务的研究及拓展仍然存在着诸多挑战与难题,但引进资本市场参与弹性电力系统的建设对于电力系统而言又是巨大的机遇。基于中国弹性电力系统及电力市场现状,未来的研究重点包括:

1)市场化的弹性电力系统建设:考虑储能系统等多种灵活分布式电力资源参与电力容量市场的途径,对极端场景下辅助服务运营商的交易模型进行合理设计;建立系统化的电力系统可靠性、弹性的经济当量评估方法,对电力系统的风险价值进行衡量,量化弹性电力系统建设水平以推动资本市场介入。

2)电力系统弹性提升的市场化机制设计:结合电力系统可靠性、弹性指标建立弹性保险精算模型并完善定价机制、成本分摊方案,根据用户的多元需求设计多险种及多样保险模式;围绕电力系统弹性提升服务框架,根据灾后用户用电迫切度对用户进行分类,设计各类用户灾后用电迫切度量化评估指标;基于面向电力系统弹性提升的市场化机制,设计具备可观收益的应急服务配置方案,有效平衡电力系统弹性及经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2744.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.
- [2] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter? : presenting a conceptual framework of power system resilience [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [3] 何大愚.美国加州电灾的分析与思考[J].电力系统自动化, 2001,25(11):17-19.
HE Dayu. Analysis and ponderation on California's electricity disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(11): 17-19.
- [4] 刘泽扬,荆朝霞.美国德州2·15停电初步分析及其对我国电力市场建设的启示[J].发电技术,2021,42(1):131-139.
LIU Zeyang, JING Zhaoxia. Preliminary analysis of the 2·15 power outage in Texas, U. S. and its enlightenment to the construction of China's electricity market [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 131-139.
- [5] 钟海旺,张广伦,程通,等.美国德州2021年极寒天气停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2022,46(6):1-9.
ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9.
- [6] 侯验秋,丁一,包铭磊,等.电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J].中国电机工程学报, 2022,42(21):7764-7775.
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775.
- [7] 胡秦然,丁昊晖,陈心宜,等.美国加州2020年轮流停电事故分析及对中国电网的启示[J].电力系统自动化,2020,44(24): 11-18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.
- [8] 何剑,屠竞哲,孙为民,等.美国加州“8·14”、“8·15”停电事件初步分析及启示[J].电网技术,2020,44(12):4471-4478.
HE Jian, TU Jingzhe, SUN Weimin, et al. Preliminary analysis and lessons of California power outage events on August 14 and

- 15, 2020[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4471-4478.
- [9] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [10] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 520-527.
- [11] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [12] WANG B, LI Y, MING W Y, et al. Deep reinforcement learning method for demand response management of interruptible load[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3146-3155.
- [13] BHATTACHARYA K, BOLLEN M H J, DAALDER J E. Real time optimal interruptible tariff mechanism incorporating utility-customer interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 700-706.
- [14] WANG J X, WANG X F, DING X Y. The forward contract model of interruptible load in power market[C]// 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, August 18-18, 2005, Dalian, China: 1-5.
- [15] KAHNAMOUEI A S, LOTFIFARD S. Enhancing resilience of distribution networks by coordinating microgrids and demand response programs in service restoration[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 3048-3059.
- [16] LEI S B, WANG J H, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2030-2041.
- [17] KIANMEHR E, NIKKHAH S, VAHIDINASAB V, et al. A resilience-based architecture for joint distributed energy resources allocation and hourly network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5444-5455.
- [18] 张保会,王立永,谭伦农,等. 市场环境下电力系统安全可靠措施的经济当量[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 41-46.
ZHANG Baohui, WANG Liyong, TAN Lunnong, et al. Economic equivalent of the power system security and reliability measure in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 41-46.
- [19] 张保会,王立永,谭伦农,等. 基于经济当量的市场环境下电网公司安全性的经济化实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 107-112.
ZHANG Baohui, WANG Liyong, TAN Lunnong, et al. Grid companies security realization based on economic equivalent in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 107-112.
- [20] 刘明明,高岩. 保险理论在需求侧风险管理中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 66-69.
LIU Mingming, GAO Yan. Application of insurance theory in risk management at demand side[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 66-69.
- [21] 王腾飞,王辉,冷亚军,等. 计及电力保险的电力市场主体最优决策[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 56-63.
WANG Tengfei, WANG Hui, LENG Yajun, et al. Power insurance based support optimal decision of electricity market subjects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 56-63.
- [22] 汤振飞,于尔铿,唐国庆,等. 基于风险管理的电力市场安全服务定价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 12-16.
TANG Zhenfei, YU Erkeng, TANG Guoqing, et al. Power market security service pricing based on risk management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 12-16.
- [23] 谢传胜,魏秀梅. 可靠性保险在中国电力市场中的应用模式[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 63-69.
XIE Chuansheng, WEI Xiumei. Research on application mode of power supply reliability insurance to electricity market in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 63-69.
- [24] 袁兆强,许强. 保险理论在电力容量市场中的应用初探[J]. 技术与市场, 2007, 14(3): 87-89.
YUAN Zhaoqiang, XU Qiang. Research on the electric capability market based on the insurance theory[J]. Technology and Market, 2007, 14(3): 87-89.
- [25] 林其友,高振华,陈星莺,等. 电力市场环境下可靠性保险在供电网络中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 117-123.
LIN Qiyu, GAO Zhenhua, CHEN Xingying, et al. Application of reliability insurances in distribution network under environment of electricity market[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 117-123.
- [26] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [27] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [28] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [29] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Power systems resilience assessment: hardening and smart operational enhancement strategies[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1202-1213.
- [30] WANG Y Z, CHEN C, WANG J H, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):

- 1604-1613.
- [31] 程乐峰, 杨汝, 刘贵云, 等. 多群体非对称演化博弈动力学及其在智能电网电力需求侧响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 20-36.
CHENG Lefeng, YANG Ru, LIU Guiyun, et al. Multipopulation asymmetric evolutionary game dynamics and its applications in power demand-side response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 20-36.
- [32] GAO B T, CHEN C, QIN Y H, et al. Evolutionary game-theoretic analysis for residential users considering integrated demand response [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1500-1509.
- [33] WU N, WANG H L, YIN L F, et al. Application conditions of bounded rationality and a microgrid energy management control strategy combining real-time power price and demand-side response [J]. IEEE Access, 2020, 8: 227327-227339.
- [34] 季节. 考虑故障恢复优先级的应急电力物资综合调度模型 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
JI Jie. Integrated dispatch model for emergency electrical supplies considering fault recovery priority [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [35] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [36] ANDERSON K, LI X K, DALVI S, et al. Integrating the value of electricity resilience in energy planning and operations decisions [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 204-214.
- [37] 温步瀛, 周峰, 程浩忠, 等. 电力市场辅助服务及其定价研究综述 [J]. 华东电力, 2001, 29(11): 30-34.
WEN Buying, ZHOU Feng, CHENG Haozhong, et al. A review on the power market auxiliary service and its pricing [J]. East China Electric Power, 2001, 29(11): 30-34.
- [38] 陈中飞, 荆朝霞, 陈达鹏, 等. 美国调频辅助服务市场的定价机制分析 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 1-10.
CHEN Zhongfei, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng, et al. Analysis on pricing mechanism in frequency regulation ancillary service market of United States [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 1-10.
- [39] 陈达鹏, 荆朝霞, 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-9.
CHEN Dapeng, JING Zhaoxia. Analysis of frequency regulation compensation mechanism in frequency regulation ancillary service market of the United States [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-9.
- [40] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16.
- [41] 李嘉媚, 艾羊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37-56.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [42] 赵晓丽, 王玫, 赵越, 等. 基于火电机组容量差异的调峰辅助服务补偿机制改进模型 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 57-61.
ZHAO Xiaoli, WANG Mei, ZHAO Yue, et al. A model of compensation mechanism on peak-regulating ancillary services based on capacity variance across thermal power units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 57-61.
- [43] 葛炬, 张粒子. 可中断负荷参与的备用市场帕累托优化模型 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 34-37.
GE Ju, ZHANG Lizi. Pareto optimality model of reserve market including interruptible load as participants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 34-37.
- [44] 李晓刚, 言茂松. 我国运行备用辅助服务市场的模式与定价研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 12-18.
LI Xiaogang, YAN Maosong. Market mode and pricing method for ancillary service market of operating reserve in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 12-18.
- [45] 丁涛, 孙嘉玮, 黄雨涵, 等. 储能参与容量市场的国内外现状 & 机制思考 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 226-239.
DING Tao, SUN Jiawei, HUANG Yuhan, et al. Domestic and foreign present situation of capacity market with energy storage and reflection on its mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 226-239.
- [46] LEI S B, CHEN C, ZHOU H, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5650-5662.
- [47] “十四五”国家综合防灾减灾规划 [J]. 中国安全生产, 2022, 17(8): 6.
“The 14th Five Year Plan” for national comprehensive disaster prevention and reduction [J]. China Occupational Safety and Health, 2022, 17(8): 6.
- [48] 张继权, 冈田宪夫, 多多纳裕一. 综合自然灾害风险管理——全面整合的模式与中国的战略选择 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 29-37.
ZHANG Jiquan, OKADA Norio, TATANO Hirkazu. Integrated natural disaster risk management: comprehensive and integrated model and Chinese strategy choice [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(1): 29-37.
- [49] MURRAY V, EBEL K L. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX) [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012, 66(9): 759-760.
- [50] 周志刚. 风险可保性理论与巨灾风险的国家管理 [D]. 上海: 复旦大学, 2005.
ZHOU Zhigang. Theory of risk insurability and national

- management of catastrophic risk [D]. Shanghai: Fudan University, 2005.
- [51] LAU P, WEI W, WANG L F, et al. A cybersecurity insurance model for power system reliability considering optimal defense resource allocation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4403-4414.
- [52] LIU Z X, WEI W, WANG L F, et al. An actuarial framework for power system reliability considering cybersecurity threats [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 851-864.
- [53] LAU P, WANG L F, LIU Z X, et al. A coalitional cyber-insurance design considering power system reliability and cyber vulnerability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5512-5524.
- [54] SUN S Y, LI G F, BIAN Y H, et al. Catastrophe risk management for electric power distribution systems: an insurance approach [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 393-410.
- [55] 夏清, 徐国新, 康重庆. 抗灾型电力系统的规划 [J]. 电网技术, 2009, 33(3): 1-7.
XIA Qing, XU Guoxin, KANG Chongqing. Planning of anti-disaster power system [J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 1-7.
- [56] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-496.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-496.
- [57] 吴郅君. 城市配电网故障差异化抢修策略研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
WU Zhijun. Research on differential emergency repair strategy of urban distribution network [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [58] 孙立娟, 顾岚. 保险公司赔付及破产的随机模拟与分析 [J]. 数理统计与管理, 1999, 18(4): 25-30.
SUN Lijuan, GU Lan. Stochastic simulation and analysis of claims and ruin for an insurance company [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 1999, 18(4): 25-30.
- [59] 于洋. 基于保险精算原理的政策性作物保险定价研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
YU Yang. Policy-oriented crop insurance pricing research based on actuarial principles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [60] 王绪瑾, 王浩帆. 改革开放以来中国保险业发展的回顾与展望 [J]. 北京工商大学学报(社会科学版), 2020, 35(2): 91-104.
WANG Xujin, WANG Haofan. Review and prospect on development of China's insurance industry since the reform and opening-up [J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Social Sciences), 2020, 35(2): 91-104.
- [61] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [62] 刘彤, 闫天池. 我国的主要气象灾害及其经济损失 [J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 90-95.
LIU Tong, YAN Tianchi. Main meteorological disasters in China and their economic losses [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2): 90-95.
- [63] 康小虎. 电力市场期货交易中的模式、电价及风险研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
LIAN Xiaohu. Mode, price and risk research in time-bargain of electric power markets [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [64] 沈瑜, 夏清, 康重庆. 中国电力市场模式的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 6-9.
SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chongqing. A novel model for restructuring of electric power industry in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 6-9.
- [65] 江健健, 夏清, 祁达才, 等. 基于期货的新型电力交易模式 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 31-37.
JIANG Jianjian, XIA Qing, QI Dacai, et al. New mechanism of electricity trade based on futures [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 31-37.
- [66] 赵希正. 强化电网安全保障可靠供电——美加“8·14”停电事件给我们的启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1-7.
ZHAO Xizheng. Strengthen power system security to ensure reliable power delivery [J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 1-7.
- [67] 张文亮, 周孝信, 白晓民, 等. 城市电网应对突发事件保障供电安全的对策研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 1-7.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, BAI Xiaomin, et al. Countermeasures against sudden events to ensure the security of urban power supply systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 1-7.
- [68] 柏海. 灾害下电网差异化规划模型研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
BAI Hai. The study of differentiation planning model in power system under disaster [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.

徐铭乾(1999—),男,博士研究生,主要研究方向:弹性电网市场化机制。E-mail: xu_mq@stu.xjtu.edu.cn

李更丰(1984—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:用户与电网友好互动、电力系统弹性评估与提升。E-mail: gengfengli@xjtu.edu.cn

别朝红(1970—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:新能源电力系统规划及可靠性、弹性电力系统。E-mail: zhbic@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 顾晓荣)

Marketization Mechanism Design for Risk Management and Resilience Enhancement of Power System Under Extreme Weather Conditions

XU Mingqian, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, ZOU Wenqiu, LI Minghao, BIAN Yiheng

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: The resilience enhancement of power systems under natural disaster conditions is of great significance to ensure the safe and stable operation of power systems. Designing the corresponding marketization mechanisms is an important way to enhance the power system resilience and incentivize the investment of electric power resources. Therefore, a marketization mechanism framework for the resilience enhancement of power systems is proposed, and the detailed definitions and modes of resilience insurance and pre-disaster electricity futures markets are given. Subsequently, insurance theory is introduced to establish the resilience insurance model, and the model of the pre-disaster electricity futures market is also proposed. Furthermore, a case analysis is conducted on the resilience insurance model, and the analysis results show that the proposed marketization mechanism can achieve the goal of maximizing the net profit of the insurance company and enhancing the power system resilience at the same time. Finally, the preliminary laws of balancing the resilience and economy of power systems are presented.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52222705).

Key words: power system; resilience; extreme weather; electricity market; insurance; electricity futures market

