

# 能源转型下弹性电力系统的发展与展望

别朝红, 林超凡, 李更丰, 邱爱慈

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049)

## Development and Prospect of Resilient Power System in the Context of Energy Transition

BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, QIU Aici

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

**ABSTRACT:** In the context of energy transition in China, the power system plays a critical role in constructing a clean, low-carbon, safe and efficient modern energy system. However, the current power system in China presents new characteristics of uncertainty, openness, and complexity, which makes it more vulnerable to the increasing natural disasters and possible manmade attacks, adding great potential risks to its operation. Focusing on the development of resilient power system in the context of energy transition, this paper first discussed the necessities of developing a resilient power system, from both internal and external aspects. Then the concept of resilient power system, including its definition, characteristics and research areas, were elaborated in detail. Afterwards, based on literature survey, the paper expounded on the key technologies of resilient power system from the point of view of primary system and cyber security, and the prospects were presented at last for the development of resilient power system in the context of energy transition in China.

**KEY WORDS:** energy transition; resilient power system; smart grid; risk assessment; distributed generation; microgrid; integrated energy system; electricity market; cyber-physical system; emerging information and communication technologies; control and protection devices

**摘要:** 我国正处在能源转型的关键时期, 电力系统对构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系意义重大。然而能源转型下的电力系统呈现不确定性、开放性、复杂性等特点, 使得现代电力系统在极端自然灾害和人为攻击下变得更加脆弱, 其运行风险急剧增大。该文以能源转型下的弹性电力系统发展展开讨论, 首先从内在要求和外在驱动两方面阐述了发展

弹性电力系统的必要性。而后重点介绍了弹性电力系统的概念, 包括详细的定义、特点及研究方向。继而在文献调研的基础上, 从电力一次系统和网络安全两个层面论述归纳了弹性电力系统研究的关键技术, 并最终对我国能源转型下的弹性电力系统发展作展望。

**关键词:** 能源转型; 弹性电力系统; 智能电网; 风险评估; 分布式电源; 微电网; 综合能源系统; 电力市场; 信息物理融合系统; 新兴信息通信技术; 控制保护设备

## 0 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。近年来, 随着化石能源消费的不断增长及碳排放的居高不下, 温室效应及全球气候变化日益加剧。为了实现可持续发展, 以绿色低碳为目标的能源转型逐渐成为国际社会的共识。

电力系统与能源的生产、输送和消费密切相关, 对能源转型起关键作用。未来 10 年中国将迎来光伏与风电大规模建设高峰<sup>[1]</sup>, 大量的可再生能源需要电力系统进行消纳; 同时, 随着电动汽车、煤改电等技术不断发展, 更多的终端能源消费开始转向电能, 安全可靠的电力供应成为经济社会发展和国民生活的必然要求。

电力系统作为世界上最大、最复杂的人造动力学系统, 容易受到各种自然灾害和人为攻击等极端事件的影响。例如 2019 年 8 月超强台风“利奇马”登陆我国东南沿海, 致浙江等省份超过 4000 条线路故障、676.95 万用户停电<sup>[2]</sup>。为了尽可能降低小概率-高损失极端事件的影响, 进一步提升电力系统安全稳定运行能力, 发展弹性电力系统成为新时代的必然趋势。

然而, 我国能源转型给弹性电力系统发展带来了诸多挑战。主要体现在系统的不确定性、开放性、

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(2019-XY-18); 国家电网公司科技项目(SGSNKY00KJJS1900037)。

Consulting Research Project of Chinese Academy of Engineering (2019-XY-18); Science and Technology Project of State Grid (SGSNKY00KJJS1900037)。

复杂性不断增加,使得电力系统在向坚强智能电网与电力物联网迈进的同时,在极端自然灾害和人为攻击下的运行风险又急剧增大。

因此,本文立足于能源转型下的弹性电力系统研究,首先从电力系统内在要求和外在驱动两方面阐述了发展弹性电力系统的必要性,其次重点介绍了弹性电力系统的定义、特点和研究内容,然后结合文献调研情况,分析了弹性电力系统在一次系统和网络安全两个层面的关键技术,最后总结归纳并对未来的研究重点进行展望。

表1 电力系统各类故障的应对策略

Tab. 1 Strategies to different power system faults

故障类型	故障特点	响应主体	应对策略
单一普通故障	概率高危害极低	第一道防线	依靠电网快速保护和预防控制:保持稳定运行和电网的正常供电
单一严重故障	概率中危害低	第二道防线	依靠电网稳定控制:保持稳定运行,但允许损失部分负荷
多重严重故障	概率低危害高	第三道防线	依靠电网失步解列、电压频率紧急控制:防止系统崩溃并尽量减少失负荷
大面积停电	概率极低危害极高	弹性电力系统	依靠有针对性的预防、响应和恢复的弹性理论、技术和工业应用:有效地预防和响应大面积停电、保障重要负荷不断电、并尽快恢复所有负荷

电,例如我国2008年南方地区发生的特大冰灾。因此,具有应对“三道防线”范畴之外的小概率-高损失极端事件能力的弹性电力系统应运而生。

## 1.2 能源转型、智能电网发展的驱动

我国目前正处在能源转型的关键时期。在习近平主席“四个革命,一个合作”能源安全新战略的指导思想下,国家发展改革委、国家能源局陆续制定了以《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》<sup>[4]</sup>(以下简称《战略》)为代表的一系列相关政策,深入推进能源革命,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系。

智能电网是在电力系统层面应对环境变化和能源短缺,实现能源转型的必然选择。智能电网的发展与应用,有利于进一步提高电网接纳和优化配置多种能源的能力,有利于推动清洁能源、分布式能源的科学利用,是能源转型的关键。

然而,能源转型下的智能电网发展给电力系统安全稳定运行带来了诸多挑战,集中体现在:

1) 系统不确定性增加。大规模间歇性新能源的并网,以及分布式电源、电动汽车的交互式接入带来的不确定性降低了系统的调频能力<sup>[5]</sup>,对电能质量、保护设备也都造成了不利影响<sup>[6]</sup>。

2) 系统开放性增加。智能电网中信息通信技术应用更广泛,存在大量自动化、信息化的通信信息设备,很容易受到网络攻击威胁<sup>[7]</sup>,且这些设备在地磁暴等强电磁环境下易损性高,容易诱发大面

## 1 发展弹性电力系统的必要性

### 1.1 电力系统的内在要求

电力系统作为世界上最庞大复杂的人造动力学系统,容易受到各种极端事件的影响,包括极端自然灾害(台风、暴雨、冰灾等)和极端人为攻击(网络攻击、电磁脉冲等)<sup>[3]</sup>。尽管《电力系统安全稳定导则》及相应的“三道防线”(如表1所示),在一定程度上保障了我国电力系统在各种常规故障下的安全稳定运行,但在极端事件的作用下,电力系统最后一道防线很可能会被突破,造成大面积停

电。

3) 系统复杂性增加。随着高比例电力电子设备、通信信息设备的不断应用,我国电力系统结构和运行方式趋于复杂,使得整个系统稳定水平降低并加大故障波及范围<sup>[8]</sup>。

因此,能源转型及智能电网的发展使得电力系统在极端事件下的运行风险急剧增大。需要发展能够有效应对极端事件的具有弹性的电力系统,保障我国能源生产和消费革命的稳步推进。

## 2 弹性电力系统的基本概念

### 2.1 弹性电力系统的定义

弹性(resilience)又称恢复力,其概念于最早于1973年由Holling C S在生态学研究提出,用以衡量生态系统承受、吸收扰动量,并保持系统稳定的能力<sup>[9]</sup>。自此以后,恢复力被广泛应用于包括电力系统在内的诸多学科中。文献[3]指出恢复力是电力系统对于扰动事件的反应能力,是弹性电力系统具有的主要特征。尽管学术界对恢复力的准确定义尚没有定论,在电力系统研究中,普遍认同的定义如下<sup>[3,10-12]</sup>:

**定义1** 恢复力:电力系统针对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力。

**定义2** 弹性电力系统:具有恢复力的电力系统。

图1形象地展示了弹性电力系统应对极端事件的基本过程,包括预先准备、抵御与吸收、响应与

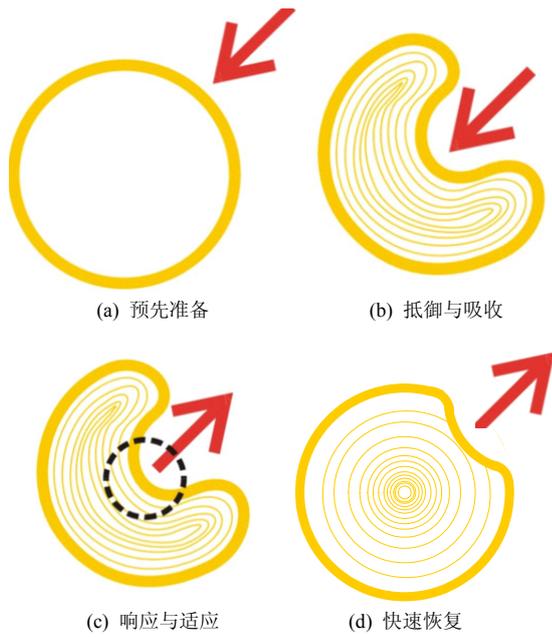


图 1 弹性电力系统应对极端事件的基本过程  
 Fig. 1 Response of a resilient power system to extreme events

适应、快速恢复 4 个阶段。

### 2.2 恢复力与可靠性、自愈性的区别

可靠性、自愈性及恢复力均能刻画电力系统应对故障的能力，但三者的内涵和应用场景具有显著的不同。可靠性是指电力系统满足用户用电需求的能力，通常采用一些均值指标(例如期望失电量 EENS)来描述系统在较长时间范围内负荷满足情况；自愈性是电力系统自我预防和自我愈合的能力，强调通过电网本身的协调与控制实现故障情况下的自治功能修复、尽可能地减少对系统正常运行的影响；而恢复力研究则针对特殊的小概率且会对电力系统造成明显破坏影响的极端事件集，提出事前预防、事中响应、事后恢复的有效方法与策略。图 2 从概率学的角度区分了可靠性、自愈性和恢复力的不同范畴。

由图 2 可以看出，可靠性、自愈性和恢复力的范畴互有重叠而又各有侧重。可靠性虽然理论上能够反映全部的故障，但由于其计算是基于平均值，因此几乎不能描述概率较小的极端事件给电力系统造成的影响；自愈性侧重分析一些负荷损失程度较小的故障，而随着故障程度的扩大，仅靠自愈能力往往不足以支撑系统的响应与恢复，这时便需要对“拖尾特性”的恢复力范畴进行研究。同时，系统自愈性的提升在一定程度上也可以提高恢复力，因此两者的范畴又有重叠。

总之，恢复力不同于可靠性的“大平均”，而

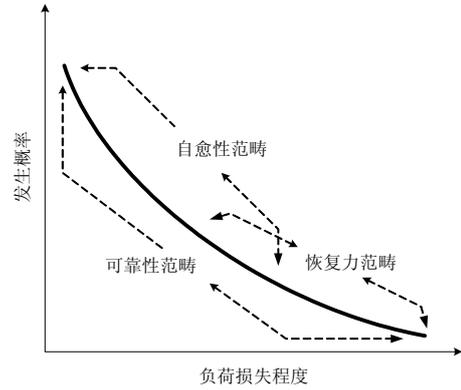


图 2 可靠性、自愈性和恢复力在概率上的区别  
 Fig. 2 Difference of reliability, self-healing ability and resilience in the perspective of probability

是针对无法预料的小概率高损失极端事件；也不局限于自愈性的“自我修复”的概念，而是更强调在无法避免的故障时，系统能有效利用各种灵活资源应对风险，适应变化的环境，维持尽可能高的运行功能，并能迅速、高效恢复系统性能。

### 2.3 弹性电力系统的特点

图 3 所示的“梯形图”<sup>[3,10-13]</sup>可以反映弹性电力系统的基本特点。该“梯形图”描述的是电力系统的性能(通常用负荷损失来衡量)在极端事件发生前、中、后的变化情况。其中实线是常规电力系统性能变化曲线，虚线为弹性电力系统性能变化曲线。

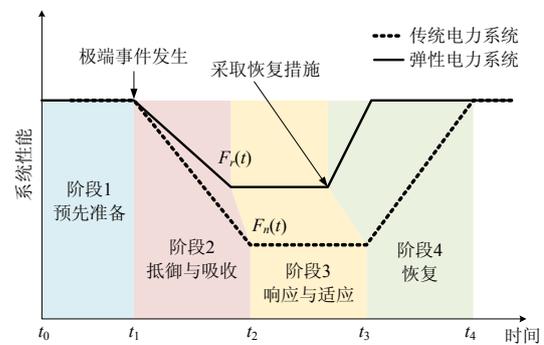


图 3 极端事件发生后弹性电力系统状态示意图  
 Fig. 3 Change of state for a resilient power system responding to an extreme event

1) 鲁棒性(阶段 1)。在极端事件发生前，弹性电力系统应具有足够的鲁棒性以抵抗可能的极端事件扰动。而为了预先提升鲁棒性，需要结合极端事件的预测模型，对电力系统的风险进行预判，以经济性最优和失负荷最小作为目标，综合进行临时的规划与部署(例如元件加固、应急资源的预布置等)，最大程度提升系统鲁棒性。

2) 充裕性(阶段 2、3)。在极端事件发生时，弹性电力系统应具有足够的充裕性以应对变化的极端事件场景。大量分布式电源、储能装置、可控

负荷是保障极端事件下的电力系统充裕性的基本元素,而这些设备的优化、调度、控制则是实现充裕性的重要手段。

3) 快速性(阶段4)。在极端事件发生后,弹性电力系统应能快速恢复负荷。而恢复过程又分为暂时功能恢复和基础设施恢复。暂时功能恢复是指利用各种弹性资源(如应急发电车、备用设备)暂时“撑”起尽可能多的负荷,尤其要优先保障重要负荷,其时间尺度较短;而基础设施恢复时间尺度更长,是指电力系统设施的完全修复,重新回到正常供电状态的过程。

从极端事件发生  $t_1$  到完全恢复系统性能  $t_4$  期间系统损失性能的累积量,即图3中的梯形面积,可以衡量某电力系统受某极端事件影响的弹性。而针对极端事件集合  $\Phi$ (如历史极端事件集、预测极端事件集、训练集等)的平均累积量,可用于评价系统的弹性水平:

$$resilience(s) = \frac{1}{size(\Phi)} \sum_{i \in \Phi} \int_{t_1}^{t_4} (F_{s,i}(t) - F_{s,0}) dt \quad (1)$$

式中:  $resilience(s)$  为系统  $s$  的弹性;  $F_{s,i}(t)$  为系统  $s$  在极端事件  $i$  下的性能曲线;  $F_{s,0}$  为系统  $s$  在正常情况下的性能。

由图3可以看出,弹性电力系统比常规电力系统在极端事件下系统性能损失累积量更小(下降幅度降低+持续时间减少),这是弹性电力系统的主要特征和优势所在。

## 2.4 弹性电力系统的研究内容

### 1) 弹性电力系统建模。

弹性电力系统的模型包括3类:极端事件的物理模型、极端事件对电力系统影响机理模型、电力系统的响应模型。极端事件的物理模型刻画了各种极端事件本身的物理特性和概率特性,例如文献[14]分别采用了不同的概率分布来刻画飓风的发生频次、风速、移动速度和持续时间;极端事件对电力系统的影响机理模型多采用简化的脆弱性曲线刻画[13],用以描述电力系统元件故障率(线路、杆塔、绝缘子、变电站等)随极端事件参数变化的情况;而电力系统的响应模型则可用于分析极端事件扰动下的电力系统状态,例如最小切负荷模型[15]、复杂网络模型[16]等。

### 2) 弹性电力系统评估。

弹性电力系统评估的主要内容是建立系统的弹性评价指标体系和评估理论。弹性评价指标又可分为静态指标和动态指标,前者刻画系统在整体意

义上的弹性,可用于弹性对比,常用蒙特卡洛法计算;后者反映系统的实时弹性,可用于系统的监测预警和优化决策,常用状态估计法计算。同时,除了最常用的失负荷指标外,网架连通性等拓扑类指标、设备冗余及维修等元件类指标、分布式电源及储能调控等资源类指标、应急响应机制等管理类指标,可通过赋予合理的权重,形成更加全面的多维度多层次弹性评价指标体系。

### 3) 弹性电力系统恢复力提升策略。

弹性电力系统恢复力提升策略按属性可分为投资策略和运行策略,投资策略[17-18]往往通过增加冗余性保障安全性(如元件加固、增加储能),其成本高但效果好;运行策略[15,19]往往通过一些智能设备、优化算法实现电力系统的灵活运行(如网络重构、孤岛运行),其成本低但效果有限。实际应用中需要两种策略结合,并综合考虑经济型和弹性的帕累托最优进行决策。另外,提升策略还可按照图3的时序划分为事前“预防”策略、事中“响应”策略、事后“恢复”策略。但三者不应该割裂开,越来越多的研究[20-21]开始将事前事中事后策略作为整体进行优化决策。

上述弹性电力系统的建模、评估和恢复力提升的研究内容及三者之间的关系如图4所示。

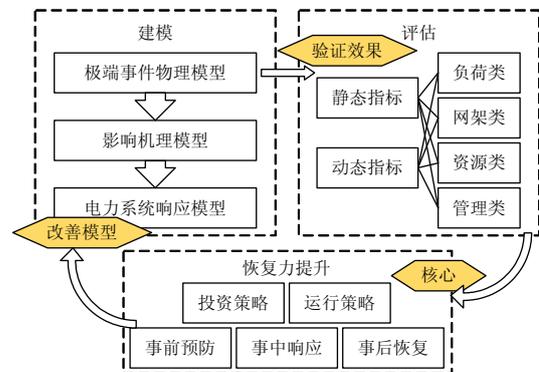


图4 弹性电力系统的建模、评估及恢复力提升

Fig. 4 Modeling, evaluation and resilience enhancement of resilient power system

## 3 弹性电力系统的关键技术

### 3.1 电力一次系统关键技术

#### 1) 最大风险和薄弱环节识别技术。

传统电力系统风险评估是基于电力系统正常运行状态的平均结果,而针对小概率-高损失极端事件,需要提出相应的最大风险识别方法,才能准确预判最坏场景,提出应对策略。表2列出了一些特定极端事件下的最大风险评估的主要原理和评估方法。可以看出,目前最大风险评估主要还是基

表 2 各种极端事件下的电力系统最大风险评估  
Tab. 2 Power system maximum risk assessment under different extreme events

文献	极端事件	影响元件	考虑因素	评估方法
[14]	飓风	线路和杆塔	配电网线路、变压器、负荷、隔离开关	最小路径和分区法
[22]	地震	变电站	传统发电厂、负荷、线路、变压器、变电站	非序贯蒙特卡洛及风险指标计算
[23]	冰灾	线路	发电机、线路、负荷	非时序蒙特卡洛及风险指标计算
[24]	磁暴	变压器	输电线路、变压器、变电站	混合暂态仿真及风险指标计算
[25]	网络攻击	保护装置	发电机、线路、负荷、保护设备	蒙特卡洛模拟和失负荷计算

于传统发电机、线路/变压器、负荷等，后果分析却也多采用基于元件故障的简单蒙特卡洛模拟，没有考虑到我国能源转型所带来的潜在风险(不确定性、开放性、复杂性)，使得最大风险评估结果偏理想化。

对于薄弱环节识别，一些常用方法的原理和计算方法列于表 3 中。可以看出，现有的识别方法存在两大不足：其一和最大风险评估类似，考虑的因素较为单一，很少考虑到新能源、新型负荷等能源转型特征的影响；其二是衡量指标还是基于“大平均”下的正常运行状态，不能识别出极端事件下的薄弱环节。

表 3 电力系统的薄弱环节识别方法

Tab. 3 Identification methods of vulnerable component in power systems

文献	考虑因素	衡量指标	计算方法
[26]	传统发电机、线路、变压器、变电站	灾难度系数	后果分析及指标计算
[27]	传统发电机、负荷、输电线路、变压器	电气介数	逐条支路故障分析
[28]	交直流线路、变压器、母线	可靠性指标 贡献比例	可靠性跟踪
[29]	节点(包括发电机和负荷)、线路	节点功率变化度	变化度 指标比较
[30]	风电场、节点、支路	信息熵	指标计算和熵权法

总之，现有最大风险评估和薄弱环节辨识方法没有对能源转型和极端事件进行综合考量。未来可以进一步研究能源转型的新增模型(如新能源模型、信息物理融合系统模型、连锁故障模型、电力电子装置模型等)，并考虑极端事件的影响机理，对电力系统进行更全面的最大风险评估和薄弱环节辨识。其流程如图 5 所示。

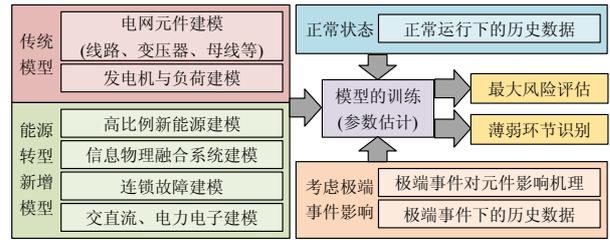


图 5 考虑能源转型和极端事件的电力系统最大风险评估和薄弱环节识别的流程

Fig. 5 Procedure of maximum risk assessment and vulnerable component identification considering energy transition and extreme events

2) 配电网应急响应和快速恢复技术。

配电网是弹性电力系统研究的重要主体，具有更直接的效益<sup>[3]</sup>，对弹性提升起到至关重要的作用。近几年有很多文献研究如何利用分布式电源和微电网进行配电网的应急响应和负荷恢复<sup>[19,31-38]</sup>。其核心是通过改变配电网的拓扑结构，并协调其中的分布式电源和微电网，实现孤岛状态下配电网的灵活运行和可靠供电。根据研究的侧重点和考虑的因素，将这些文献总结于表 4 中。

表 4 利用分布式电源和微电网的响应和恢复方法

Tab. 4 Response and restoration methods using distributed generators and microgrids

侧重点	文献	考虑的因素
控制配电网的联络开关实现微电网划分来减少负荷损失	[31] [19] [32]	仅考虑可调和不可调度 DG 进行微电网划分 进一步考虑联络开关以及多代理通信的影响 更进一步考虑各种智能元件系统的应用以及故障、开关、DG 的动态特性
通过微电网和供电路径，给重要负荷供电	[33] [34] [35]	考虑不确定性、微电网生存时间 进一步考虑微电网稳定性和 DG 动态特性 更进一步将其应用在二级配电网网络中
确定负荷恢复的时序顺序	[36-37] [38]	基于固定时间步长，考虑复电顺序约束的时序顺序 进一步提出改进时间步长和变时间步长模型

表 4 中的文献从不同方面切入配电网在极端事件下的运行和恢复问题，提出了有效的模型和方法。然而配电网中需要考虑的因素太多，尚待研究的包括如何准确刻画分布式电源/储能/电动汽车/可控负荷等能源转型特征、如何计及控制及自动化设备的影响、如何考虑动态特性等等，需要提出更全面的建模、优化及仿真分析方法。

3) 综合能源系统的弹性理论体系。

①弹性综合能源系统建模。基于综合能源系统精细化模型<sup>[39-40]</sup>，分析各种极端事件对综合能源系统元件的影响机理，研究综合能源系统故障传递模式和响应模型，形成系统的恢复力模型。

②综合能源系统弹性评估。文献[40]评估了系

统在极端天气及负荷下的弹性,但没有计算弹性指标。文献[41]提出用输电线路/输气管道故障数来衡量网络侧的弹性,用失电/气负荷来衡量负荷侧的弹性,但这种弹性指标体系较为单一。借鉴2.4节中的思想,未来考虑构建多维度多层次的综合能源系统弹性评价指标和评估方法。

③综合能源系统弹性提升策略。文献[42]利用地下天然气管网不易受极端事件影响的特点,以输气通道代替部分输电通道进行规划以求得整体弹性最优。文献[43]解决了电-气综合能源系统的在多重故障下的机组组合问题以提升运行弹性。文献[44]考虑了电-气耦合系统的网络重构及孤岛运行模式,对灾后恢复的人员调配进行优化。上述规划、运行、恢复层面上策略在一定程度上提高了综合能源系统的弹性,但在分布式电源、可控负荷等能源转型特征上考虑还不够。

#### 4) 电力市场下的弹性提升技术。

电力市场及需求侧响应能提高电力系统弹性。美国 PJM 公司在 2014 年极低漩涡(Porla Vortex, 一种发生于极地上空的大规模气旋)中曾 3 次启动需求侧响应<sup>[45]</sup>。尽管电价一度被抬高到 1.8 美元/千瓦时,但成功保障了供电。极端天气下的需求侧响应比传统机组调节方法更加可靠,且响应速度更快、调节更灵活<sup>[45]</sup>,因此能更有效地提升电力系统弹性,降低系统运行成本。

尽管一些文献<sup>[46-47]</sup>通过算例验证了需求侧响应对弹性提升的重要性,但都只采用了简单的价格激励,没有形成系统的电力市场机制和模式。未来研究的重点包括:弹性资源的聚集、弹性参与的电力市场机制设计、基于电力市场的应急响应和灾后恢复方法,以构建极端事件下基于各类弹性资源的更加完善的市场机制。

### 3.2 网络安全与电力二次系统关键技术

#### 1) 网络安全。

电力系统网络安全及其弹性的研究主体是以电力系统、网络通信系统为载体的电力信息物理融合系统(cyber-physical power system, CPPS)。CPPS 可分为 3 层:物理层、交互层、信息层,其结构如图 6 所示。

网络攻击的直接对象是图 6 信息层和交互层中的设备。常见的网络攻击方法包括<sup>[7]</sup>:拒绝服务 DoS、丢包、改变拓扑、错误数据注入、恶意软件病毒等。最终其影响传递到物理层,使得电力系统元件设备故障,造成停电事故。

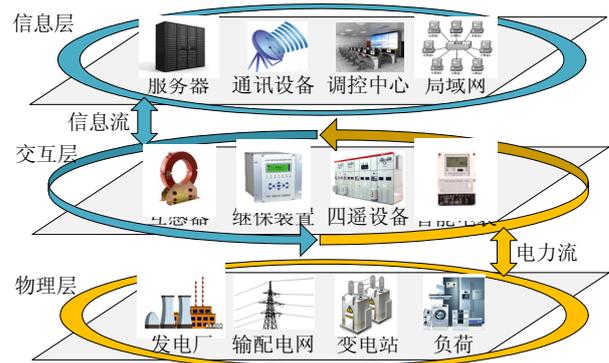


图 6 电力信息物理融合系统结构

Fig. 6 Cyber-physical power system structure

对 CPPS 弹性的研究分为以下方面:

①弹性 CPPS 建模。CPPS 建模研究目前已较为深入,根据侧重点不同,形成了多样化的建模理论。例如从控制角度出发的混合系统模型<sup>[48]</sup>、从简化复杂信息网络出发的等值模型<sup>[49]</sup>、从耦合特性建模出发的关联特性矩阵模型<sup>[50]</sup>等等。但还没有文献从弹性的角度形成 CPPS 的建模理论体系,无法刻画极端事件,尤其是网络攻击,对信息系统及耦合系统的影响。

②CPPS 弹性评估。文献[51]提出了一种考虑系统不同维度特性的 CPPS 弹性度量方法;文献[52]基于信息系统和物理系统各自的弹性及两者之间的联系,建立了 CPPS 弹性的度量和评估方法。上述文献都侧重于描述 CPPS 的动态特性,难以与稳态层面的电力系统的弹性评估对接。

③CPPS 弹性提升策略。CPPS 的弹性提升依然可以从“事前”、“事中”、“事后”进行分析。一些提升策略归纳在表 5 中。

表 5 中的文献都表明了信息系统对电力系统弹性提升的重要性,但大多数文献都是以电力系统为主体进行分析,而弱化了信息系统的本身的特性,不能刻画对全局弹性提升的作用。未来可以考虑从整体角度研究针对 CPPS 的加固策略、应急响应机

表 5 电力信息物理融合系统弹性提升策略

Tab. 5 Resilience enhancement strategies for cyber-physical power systems

侧重点	文献	采用的方法和目标
事前预防	[53]	最优化的 PMU 及通讯设施配置提升弹性
	[54]	PMU 网络的自愈重构维持电力系统的感知力
事中响应	[55]	错误信息的识别和隔离以保证控制算法的可靠性
	[56]	将电力信息耦合模型转化为混合整数线性规划进行最优潮流求解以增强系统的弹性
事后恢复	[19]	分布式多代理通信下的微电网划分进行负荷恢复
	[57]	电力系统和通信系统的协同恢复以提升效率

制、维修方案等。

2) “大云物移智链”等新兴技术融合。

“大云物移智链”(大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能、区块链)等现代信息技术、先进通信技术在应对极端事件、提升弹性方面具有强大潜力。例如人工智能技术构建的地震模拟、评估和响应系统能减少基础设施因地震造成的损失<sup>[58]</sup>；利用大数据技术实现灾害实时数据的广泛收集，提高海量数据的融合处理能力，为应急人员提供实时动态策略，从而构建弹性城市<sup>[59]</sup>。然而，这些技术尚未被有效应用在弹性电力系统提升中。图7展示了利用“大云物移智链”提升弹性电力系统信息交互和信息处理能力(即“感知力”)，并通过全景信息可视化系统进行弹性资源控制，从而提升系统弹性的构思。

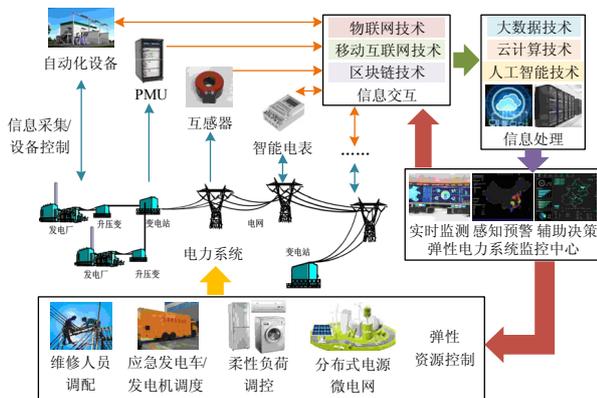


图7 弹性电力系统与新兴技术融合示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the integration of resilient power system and emerging technologies

3) 从理论到实际：控制保护装置设计。

弹性电力系统理论研究与工业应用还存在很大差距<sup>[32]</sup>，需要对二次系统中的控制保护装置进行改进才能实现弹性提升策略的实用化。

以利用微电网提升配电网弹性为例。在控制层面，需要设计能灵活适应不同运行状态的微电网控制器，还要进行稳定性分析和硬件在环实验；在保护层面，由于配电网拓扑变换下的运行方式复杂多变，需要设计适用于灵活配电网的自适应继电保护装置。

## 4 未来研究展望

随着能源转型和智能电网技术的不断深入，弹性电力系统发展进入新阶段。能源转型既给弹性电力系统的发展带来了诸多挑战，又为其提供了现代化技术与平台的机遇，是一把“双刃剑”。基于弹性电力系统研究现状，并结合我国能源转型实际，

未来的研究重点有：

1) 在电力一次系统层面：①考虑能源转型特征和极端事件影响机理，对电力系统进行最大风险评估和薄弱环节识别；②提出更全面的弹性配电网建模、优化及仿真分析方法；③建立综合能源系统的弹性理论体系；④挖掘电力市场对弹性提升的潜力，构建弹性参与的市场机制。

2) 在网络安全与电力二次系统层面：①研究电力信息物理融合系统的弹性建模、评估和提升方法，以抵御网络攻击；②推进“大云物移智链”新兴技术在弹性电力系统中的应用；③设计面向能源转型下灵活配电网的控制保护装置。

## 5 结论

1) 发展弹性电力系统既是应对各类故障事件的内在要求，又是能源转型与智能电网技术所带来不确定性、开放性、复杂性的外在驱动。

2) 弹性电力系统是具有对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复能力的电力系统；不同于可靠性的“大平均”概念，也不限于自愈性范畴；弹性电力系统具有鲁棒性、充裕性、快速性3个基本特点；其研究方向涵盖了建模、评估和提升策略3个方面。

3) 未来应结合我国能源转型的新特征，重点研究一次系统、网络安全等方面的弹性建模、评估和提升关键技术。

## 参考文献

- [1] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源展望 2018[R]. 北京: 国家可再生能源中心, 2018. National Renewable Energy Center. China's renewable energy outlook 2018[R]. Beijing: National Renewable Energy Center, 2018(in Chinese).
- [2] 国家电网党组宣传部. 国家电网全力抗击超强台风“利奇马”[EB/OL]. 北京: 国家电网有限公司, (2019-08-12) [2019-09-30]. [http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc\\_main/col2017021449/2019-08/11/20190811210720091182400\\_1.shtml](http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017021449/2019-08/11/20190811210720091182400_1.shtml). Propaganda Department of State Grid Party group. State Grid to fight against super typhoon “lichima” [EB/OL]. Beijing: State Grid Co., Ltd.(2019-08-12)[2019-09-30]. [http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc\\_main/col2017021449/2019-08/11/20190811210720091182400\\_1.shtml](http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017021449/2019-08/11/20190811210720091182400_1.shtml) (in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016-2030)[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, (2016-12-29)[2019-09-30]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content\\_5230568.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm). National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Energy production and consumption revolution strategy(2016-2030)[EB/OL]. Beijing: National Development and Reform Commission of the People's Republic of China,(2016-12-29) [2019-09-30]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content\\_5230568.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm)(in Chinese).
- [5] Wang Ye, Silva V, Lopez-Botet-Zulueta M. Impact of high penetration of variable renewable generation on frequency dynamics in the continental Europe interconnected system[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 10-16.
- [6] 韦钢, 吴伟力, 胡丹云, 等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40. Wei Gang, Wu Weili, Hu Danyun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 36-40(in Chinese).
- [7] 汤奕, 陈倩, 李梦雅, 等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 59-69. Tang Yi, Chen Qian, Li Mengya, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-69(in Chinese).
- [8] 梅生伟, 薛安成, 翁晓峰, 等. 复杂互联电网大停电风险研究综述及预防控制展望[C]//第二十四届中国控制会议论文集. 广州: 中国自动化学会, 2006. Mei Shengwei, Xue Ancheng, Weng Xiaofeng, et al. Summary on risk of blackouts in complex interconnected power grids and prospects of its preventive control[C]// The 24th Chinese Control Conference. Guangzhou: China Automation Society, 2006(in Chinese).
- [9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
- [10] 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.
- [11] Li Zhiyi, Shahidehpour M, Aminifar F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.
- [12] Bie Zhaohong, Lin Yanling, Li Gengfeng, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [13] Ouyang Min, Dueñas-Osorio L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. Structural Safety, 2014, 48: 15-24.
- [14] Li Gengfeng, Zhang Peng, Luh P B, et al. Risk analysis for distribution systems in the Northeast U.S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
- [15] Huang Gang, Wang Jianhui, Chen Chen, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [16] Bompard E, Pons E, Wu Di. Analysis of the structural vulnerability of the interconnected power grid of continental Europe with the Integrated Power System and Unified Power System based on extended topological approach[J]. European Transactions on Electrical Power, 2013, 23(5): 620-637.
- [17] Salman A M, Li Yue, Stewart M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 144: 319-333.
- [18] Lisnianski A, Levitin G, Ben-Haim H, et al. Power system structure optimization subject to reliability constraints[J]. Electric Power Systems Research, 1996, 39(2): 145-152.
- [19] Chen Chen, Wang Jianhui, Qiu Feng, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [20] Ma Shanshan, Chen Bokan, Wang Zhaoyu. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [21] Lin Yanling, Bie Zhaohong. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1266-1279.
- [22] 贺海磊, 郭剑波. 考虑共因失效的电力系统地震灾害风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 44-54. He Hailei, Guo Jianbo. Seismic disaster risk evaluation for power systems considering common cause failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 44-54(in Chinese).
- [23] 张勇军, 许亮, 吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 12-17. Zhang Yongjun, Xu Liang, Wu Chengwen. Research on ice disaster risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 12-17(in Chinese).
- [24] 吴伟丽, 刘连光, 王开让. 磁暴扰动下电力系统故障风

- 险评估方法与模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 830-839.
- Wu Weili, Liu Lianguang, Wang Kairang. Risk assessment methods and models of power system fault due to geomagnetic disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 830-839(in Chinese).
- [25] Liu Xindong, Shahidehpour M, Li Zuyi, et al. Power system risk assessment in cyber attacks considering the role of protection systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 572-580.
- [26] 别朝红, 王锡凡. 复杂电力系统一类连锁反应事故可靠性评估模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(20): 30-34.
- Bie Zhaohong, Wang Xifan. Studies on models and algorithms of reliability evaluation for cascading faults of complicated power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(20): 30-34(in Chinese).
- [27] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
- Xu Lin, Wang Xiuli, Wang Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39(in Chinese).
- [28] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 广东电网薄弱环节辨识及可靠性改善分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 98-102.
- Ji Jing, Xie Kaigui, Cao Kan, et al. Weak part identification and reliability improvement analysis of Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 98-102(in Chinese).
- [29] 李玲玲, 鲁修学, 孙东旺, 等. 基于元件功率的区域电力系统薄弱环节辨识算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 77-83.
- Li Lingling, Lu Xiuxue, Sun Dongwang, et al. An identification algorithm of the weak links for regional power system based on element power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 77-83(in Chinese).
- [30] 靳冰洁, 张步涵, 姚建国, 等. 基于信息熵的大型电力系统元件脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 61-68.
- Jin Bingjie, Zhang Buhuan, Yao Jianguo, et al. Large-scale power system components vulnerability assessment based on entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 61-68(in Chinese).
- [31] Wang Zhaoyu, Wang Jianhui. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3139-3149.
- [32] Kim Y J, Wang Jianhui, Lu Xiaonan. A framework for load service restoration using dynamic change in boundaries of advanced microgrids with synchronous-machine DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3676-3690.
- [33] Gao Haixiang, Chen Ying, Xu Yin, et al. Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2837-2848.
- [34] Xu Yin, Liu C C, Schneider K P, et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 426-437.
- [35] Xu Yin, Liu C C, Wang Zhiwen, et al. DGs for service restoration to critical loads in a secondary network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 435-447.
- [36] Chen Bo, Chen Chen, Wang Jianhui, et al. Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1507-1520.
- [37] Chen Bo, Chen Chen, Wang Jianhui, et al. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6793-6805.
- [38] Chen Bo, Ye Zhigang, Chen Chen, et al. Toward a MILP modeling framework for distribution system restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1749-1760.
- [39] Clegg S, Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: high-resolution spatial and temporal heat demand modeling[J]. Energy, 2019, 184: 180-190.
- [40] Clegg S, Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part II: transmission network analysis and low carbon technology and resilience case studies[J]. Energy, 2019, 184: 191-203.
- [41] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 41-49.
- Qi Shixiong, Wang Xiuli, Shao Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-49(in Chinese).
- [42] Shao Chengcheng, Shahidehpour M, Wang Xifan, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.
- [43] Li Yang, Li Zhiyi, Wen Fushuan, et al. Minimax-regret robust co-optimization for enhancing the resilience of integrated power distribution and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 61-71.

- [44] Lin Yanling, Chen Bo, Wang Jianhui, et al. A combined repair crew dispatch problem for resilient electric and natural gas system considering reconfiguration and DG islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2755-2767.
- [45] Wang Fei, Xu Hanchen, Xu Ti, et al. The values of market-based demand response on improving power system reliability under extreme circumstances[J]. Applied Energy, 2017, 193: 220-231.
- [46] Kianmehr E, Nikkiah 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.
- [47] Bynum M, Castillo A, Watson J P, et al. Evaluating demand response opportunities for power system resilience using MILP and MINLP formulations[J]. AIChE Journal, 2019, 65(7): e16508.
- [48] 王云, 刘东, 陆一鸣. 电网信息物理系统的混合系统建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1464-1470, 1759.  
Wang Yun, Liu Dong, Lu Yiming. Research on hybrid system modeling method of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1464-1470, 1759(in Chinese).
- [49] 郭庆来, 辛蜀骏, 孙宏斌, 等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估: 驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1481-1489, 1761.  
Guo Qinglai, Xin Shujun, Sun Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489, 1761(in Chinese).
- [50] 薛禹胜, 李满礼, 罗剑波, 等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 11-19.  
Xue Yusheng, Li Manli, Luo Jianbo, et al. Modeling method for coupling relations in cyber physical power systems based on correlation characteristic matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 11-19(in Chinese).
- [51] Friedberg I, McLaughlin K, Smith P, et al. Towards a resilience metric framework for cyber-physical systems [C]//Proceedings of the 4th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research. Swindon: BCS Learning & Development Ltd, 2016.
- [52] Clark A, Zonouz S. Cyber-physical resilience: definition and assessment metric[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1671-1684.
- [53] Almeida L, Gomes T, Antunes C H. Optimization of PMU location and communications in a power grid[C]//Proceedings of 2019 11th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling. Nicosia, Cyprus: IEEE, 2019.
- [54] Lin Hui, Chen Chen, Wang Jianhui, et al. Self-healing attack-resilient PMU network for power system operation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1551-1565.
- [55] Duan Jie, Zeng Wentu, Chow M Y. Attack detection and mitigation for resilient distributed DC optimal power flow in the IOT environment[C]//Proceedings of 2006 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics. Santa Clara, CA, USA: IEEE, 2016.
- [56] Huang Gang, Wang Jianhui, Chen Chen, et al. Cyber-constrained optimal power flow model for smart grid resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5547-5555.
- [57] Li Zhiyi, Shahidehpour M, Galvin R W, et al. Collaborative cyber-physical restoration for enhancing the resilience of power distribution systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, OR, USA: IEEE, 2018.
- [58] Tang Aiping, Wen Aihua. An intelligent simulation system for earthquake disaster assessment[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(5): 871-879.
- [59] Yang Chuanjie, Su Guofeng, Chen Jianguo. Using big data to enhance crisis response and disaster resilience for a smart city[C]//Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis. Beijing: IEEE, 2017.



别朝红

在线出版日期: 2020-04-03。

收稿日期: 2019-11-05。

作者简介:

别朝红(1970), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估、电力系统恢复力、能源互联网优化运行, zhbic@mail.xjtu.edu.cn;

林超凡(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统恢复力、电力系统不确定性分析, lin.xjtu@yahoo.com;

李更丰(1984), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统恢复力、综合能源系统可靠性评估, gengfengli@mail.xjtu.edu.cn;

邱爱慈(1941), 女, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为高功率脉冲技术和强流电子束加速器技术, acqiu@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

# Development and Prospect of Resilient Power System in the Context of Energy Transition

BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, QIU Aici  
(Xi'an Jiaotong University)

**KEY WORDS:** energy transition; resilient power system; smart grid; risk assessment; distributed generation; micro- grid; integrated energy system; electricity market; cyber- physical system; emerging information and communication technologies; control and protection devices

Urged by severe environmental problems and exhausting fossil energy situation, many countries including China take an energy transition road for sustainability. Power system with inclusive renewable energy plays a critical role in this process. However, the exposed system is susceptible to extreme events (hurricane, ice-storm, cyber-attack, etc.) and the energy transition would further increase the operational risk. Therefore, it is necessary to enhance the power system resilience under energy transition.

This paper reviews the state-of-the-art development on resilient power system and makes prospects for future studies in the context of energy transition. It includes four major parts: 1) the necessities; 2) the concept; 3) the key technologies (literature survey); and 4) the prospects of resilient power system.

1) The necessities: the internal requirement of power system safety and the external prompt by energy transition.

The current protection and control strategies of power system are designed for normal faults mitigation, which cannot deal with the extreme situation of widespread blackout. Besides, the energy transition increases the uncertainty, openness and complexity of power system, making the system more vulnerable to various extreme events.

2) The concept: the resilient power system is a kind of system which has the abilities of preventing and resisting low-probability-high-impact extreme events, and recovering loads as soon as possible.

Resilience is different from reliability, which focuses on the average performance of power system in a long period. It is also different from self-healing ability with protection and control devices, but is more concerned about how to use flexible resources to cope with the worst scenarios. A resilient power system should be robust before an extreme event occurs, and redundant

under the event, and can rapidly recover loads after the event. The research areas of resilient power system can be categorized into modeling, evaluation, and enhancement strategies.

3) The key technologies include those of the primary power system and those of the secondary system/cyber security.

The technologies of the primary power system can be summarized as: a) maximum risk assessment and vulnerable component identification methods; b) emergency response and load restoration methods of distribution systems; c) modeling, evaluation and enhancement strategies of resilient integrated energy system; and d) design of electricity market paradigm to improve power system resilience.

The technologies of the secondary system/cyber security are as follows: a) resilience-oriented modeling, evaluation and enhancement of cyber-physical power system; b) integration of resilient power system and emerging technologies (big data, internet of things, etc.); and c) update of protection and control devices to accommodate resilience enhancement measures.

4) The prospects: deal with the challenges, as well as take the benefits from energy transition.

In one aspect, the characteristics of energy transition should be taken into the consideration of resilient power system studies. The uncertainty of renewable energy, the openness of cyber-physical power system, and the complexity of network have not yet been fully integrated in resilience analysis.

In another aspect, the energy transition also brings about many chances, such as flexible distributed generation/storage devices, integrated energy system, and modern information and communication technologies and platforms. In the future, their potentials in enhancing power system resilience need to be further exploited.