

电力系统的柔性、弹性与韧性研究

鞠平^{1,2}, 王冲², 辛焕海¹, 李洪宇², 江道灼¹, 沈赋²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:综述电力系统柔性和弹性的研究进展,指出“柔性”侧重于描述电力系统灵活可调的能力,“弹性”侧重于描述电力系统抗击极端事件的能力。随着电力系统中持续性的随机扰动不断增加,“柔性”和“弹性”均不能描述电力系统耐受持续随机扰动的能力,为此,提出“电力系统韧性”的概念,即电力系统在持续的随机扰动之下不发生崩溃、解列而保持正常运行的能力,并给出电力系统韧性的研究内容和技术路线,包括描述模型、分析方法、评价指标和提升途径等。

关键词:电力系统;柔性;弹性;韧性

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911001

0 引言

随着电力系统中变化因素日益增加,电力系统需要足够的调节能力来应对各种变化造成的供需不平衡。基于此,电力系统“柔性”的概念被提出。另一方面,随着外界极端事件的增多,电力系统需要在事件发生的不同阶段具有足够的能力来应对极端事件。基于此,电力系统“弹性”的概念被提出。电力系统柔性着重描述电力系统的灵活可调的能力,电力系统弹性着重描述电力系统的抗击极端事件的能力。

然而,电力系统中各种持续的随机扰动不断增加,包括新能源的持续随机扰动、新负荷的持续随机扰动等,需要电力系统具有某种能力以应对这些持续的随机扰动。目前,侧重系统灵活可调能力的柔性和侧重系统抗击极端事件能力的弹性,并不能很好地描述持续的随机扰动对电力系统的影响。因此,本文提出了“电力系统韧性”这一概念,以应对持续的随机扰动对电力系统的影响。

1 电力系统柔性

1.1 名词释义

《现代汉语词典》^[1]对“柔”的释义是:软。对“柔性”没有释义。《辞海》^[2]对“柔性”和“柔软”没有释义。《英汉双解大词典》^[3]对“flexibility”的释义是:the ability to bend without breaking。

《中国电力百科全书》^[4]对“灵活交流输电系统FACTS(Flexible AC Transmission System)”的释义是:基于电力电子技术对交流输电系统实施灵活快

速调节控制的交流输电系统,又称“柔性交流输电系统”。对“柔性直流输电”的释义是:基于全控型电力电子器件构成的电压源换流器高压直流系统(VSC-HVDC)。

1.2 电力系统柔性研究背景

随着对绿色、经济、安全、可靠供电要求的不断提高,电力系统中引入了越来越多的新能源、新技术,具体包括以下几点。①新能源的大量接入。当今社会面临能源安全和气候变化的挑战,为了实现可持续发展,新能源已成为未来电力系统的重要支撑。《中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究》^[5]中提出2050年中国的风电和光伏的发电量占比将分别为35%和28%左右。高比例的新能源增加了电源侧发电的不确定性和波动性。②高压交-直流输电系统的接入。高压交-直流输电系统提高了系统的输送能力,但电力电子设备的故障可能导致负荷中心瞬时出现大额功率缺额。③主动负荷的接入。主动负荷具有一定的自主调节能力,同时,很多主动负荷和用户行为有关,增加了负荷的波动性。上述三方面都增加了电力系统实现实时供需平衡调度的困难。因此,需要对供需两侧应对系统中各种变化的能力进行研究,即对电力系统柔性的研究^[6-10]。IEEE以“Energy System Flexibility”为主题发表的专辑^[11-16]表明,电力系统柔性得到了国际学界高度关注。

1.3 电力系统柔性指标

电力系统柔性的量化指标需要充分反映整个系统的能量 $E(\text{MW}\cdot\text{h})$ 、系统响应速度 $R(\text{MW}/\text{min})$ 、系统的功率调节幅度 $P(\text{MW})$ 以及系统响应时间 $t(\text{min})$,如图1所示^[17-18],这些变量从物理角度反映了电力设备在安全经济的条件下进行能量交换的能力。根据系统的特点,电力系统柔性指标可以分为设备级^[19]和系统级^[20]。

设备级的柔性指标主要与电力设备自身的物理

收稿日期:2019-05-07;修回日期:2019-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004);111引智计划项目(B14022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004) and the 111 Project(B14022)

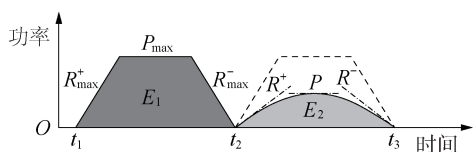


图1 电力系统柔性指标

Fig.1 Power system flexibility metrics

属性以及当前运行状态有关。比如,储能设备的柔性调节能力指标与储能容量、储能充放电次数等属性有关;发电机设备的柔性调节能力指标与其额定容量、最小发电出力、最小启停时间、爬坡率等属性相关,同时还与发电机当前运行的状态有关。

系统级的柔性指标主要是衡量在给定的安全经济条件下系统所具备的调节能力。目前,常用的指标构建方法有3种:①基于设备柔性指标定义的柔性指标;②基于系统的可靠性指标定义的柔性指标;③综合考虑设备的技术特性,将经济代价纳入系统中构建的柔性指标。典型的柔性量化指标包括IRRE(Insufficient Ramping Resource Expectation)^[21-22]、PFD(Periods of Flexibility Deficit)^[23]、TUSFI(Technical Uncertainty Scenarios Flexibility Index)^[24]、TEUSFI(Technical Economical Uncertainty Scenarios Flexibility Index)^[25]等指标。除此之外,R Billinton^[26]等提出的考虑机组爬坡速率、响应容量概率分布的响应风险度(response risk)可以作为评估系统柔性的重要指标。

1.4 电力系统柔性评价

目前,电力系统柔性评价方法包括:基于现有的评价指标对相关的运行方案进行评估;通过对变化源(如风电、光伏的出力)的物理特性进行研究,将其变化纳入系统的优化调度中^[27-30]。根据电力系统规划运行特点,可以从发电规划和运行调度2个层面来探讨电力系统柔性评价方法。

在发电规划阶段,需要充分考虑发电容量的冗余性,以应对未来系统运行中面临的不确定性。文献[31]考虑含风电场的电源规划问题,以期望负荷构建柔性评估指标,通过启发式迭代算法得到满足柔性需求和容量裕度的发电规划方案。文献[32]通过2种不同的柔性评估指标分析电源规划中网络约束对系统柔性的影响。文献[33]提出评估单台设备以及整体系统的柔性指标,并在考虑系统柔性指标的情况下分析发电机建设对系统机组组合的影响,优化柔性资源的最优配置。

在运行调度阶段,基于现有的系统结构、可调度发电机等对系统在未来一段时间内的响应能力进行量化,以在既有资源的基础上实现最佳优化策略来保证满足系统柔性要求。文献[34-36]基于风电出力的概率信息,利用情景生成的方法对系统的备用

容量进行优化。文献[37-40]研究发电机爬坡对系统柔性的影响。文献[41-42]研究市场机制对系统柔性的影响。除此之外,不少文献研究了需求侧响应^[43]、电动汽车^[44]、储能^[45-49]等资源对提高系统柔性的相关策略。

2 电力系统弹性

2.1 名词释义

《现代汉语词典》对“弹性”的释义是:物体受外力作用变形后,除去作用力时能恢复原来形状的性质。《辞海》对“弹性”的释义是:材料或物体在外力作用下产生变形,若除去外力后变形随即消失的性质。《英汉双解大词典》对“resilience”的释义是:the ability to readily recover from shock, grief etc.。

2.2 电力系统弹性研究背景

近年来,随着全球气候的变化,极端事件(比如台风)的强度、频度不断增加,因此造成的停电事故也越来越多^[50-51]。在美国,每年因极端事件造成的停电事故引起的经济损失高达\$2.5×10¹⁰^[52]。2014年9月16日,台风“海鸥”在海南文昌市翁田镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为13级(40 m/s),海口、文昌、澄迈、临高、儋州、琼海一带灾情严重。根据统计,全海南省共造成220 kV线路累计停运12条,110 kV线路停运26条,35 kV线路停运21条,10 kV主线路停运596条,110 kV变电站停运6座,35 kV变电站停运22座,影响用户124.5万户。为了应对这些可能发生的极端事件,构建安全可靠的电力系统已成为系统运行人员的重要任务之一。美国国家研究委员会^[53]、北美电力可靠性公司^[54-56]、美国电力研究院^[57]等机构分析了极端事件对电力系统的影响,认为提高电力系统弹性是应对外部极端事件的重要手段。IEEE以“Power Grid Resilience”为主题发表专辑^[58-64],表明“电力系统弹性”受到国际学界高度关注。

2.3 电力系统弹性研究框架

目前,不同机构对系统弹性的定义还未统一:美国国家科学院及美国基础设施咨询委员会将其定义为一种“prepare and plan for, absorb, recover from and more successfully adapt to adverse events”的能力^[53,65];英国内阁办公室将其定义为一种“anticipate, absorb, adapt to and/or rapidly recover from a disruptive event”的能力^[66]。虽然不同机构对系统弹性的描述不同,但是其关键内容具有相似性,即弹性的系统在面对极端事件时具有预防性能力、实时调度能力以及恢复性能力。基于此,构建系统弹性的框架如图2所示^[53]。

预防性策略是指在极端事件发生之前,增加系统应对极端事件冲击能力的策略,包括加强系统网

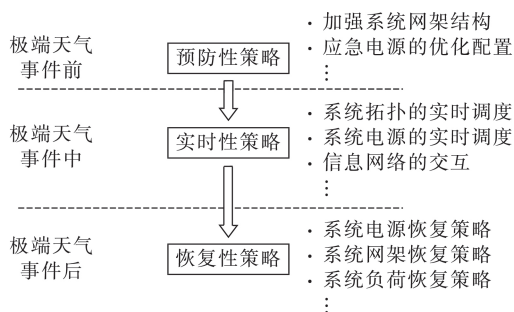


图2 系统弹性策略框架

Fig.2 Framework of power system resilience strategy

架结构、合理配置应急电源等；实时性策略是指在极端事件发生过程中，可以使系统消纳极端事件冲击能力的策略，包括系统拓扑的实时调度、系统电源的实时调度等；恢复性策略是指在极端事件发生后，可以使系统快速恢复到正常运行状态的策略，包括电源的恢复、网架的恢复以及负荷的恢复。

2.4 电力系统弹性策略

基于系统弹性策略的框架，目前已有不少文献对极端事件发生前、极端事件发生中以及极端事件发生后的弹性策略进行研究。

(1)极端事件发生前的预防性策略。在构建预防性策略时，系统运行人员首要关注的是极端天气事件对系统的影响。考虑极端天气的随机性，基于数据的统计模型是目前常见的研究方法。该方法利用已有的相关数据，通过智能算法和启发式算法得到系统故障与极端天气事件的函数关系^[67-74]。文献[75-77]通过系统网架优化、应急电源的优化配置、系统线路的检维修策略等手段预防性地提高系统应对潜在极端天气的能力。在上述研究中，鲁棒优化模型以及基于场景生成的多层优化模型被用于处理极端天气事件的随机性。文献[78]研究在考虑系统故障后失负荷最小的情况下最优电源容量配置问题。文献[79]为了评估电力系统在遭受极端扰动事件后的恢复能力，将韧性的概念引入电力系统中。文献[80]评估极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系。

(2)极端事件发生中的实时性策略。此阶段要求系统运行人员根据系统的实时状态来调整调度策略。文献[81]基于系统拓扑的当前状态以及极端天气事件对拓扑的后续影响，构建基于马尔科夫决策过程的优化调度模型，基于该模型可以得到系统拓扑结构到最优调度策略的映射关系。文献[82-83]通过构建孤岛策略应对极端天气事件发生时系统潜在的连锁故障，进而减少潜在的失负荷。

(3)极端事件发生后的恢复性策略。在故障发生后，系统运行人员需要将系统快速恢复到正常运行状态。该过程包括电源的恢复、网架的恢复以及负

荷的恢复，是一个多时段、多目标、多状态的优化问题。文献[84]基于GRMs(Generic Restoration Milestones)算法构建一套可以在系统部分故障或者全部故障后的恢复策略。在配电系统中，为了快速恢复供电，系统维修人员的调配优化是一个重要问题，文献[85-86]利用混合整型优化模型处理维修人员的调配优化问题，使系统故障区域可以快速恢复供电。

3 电力系统韧性

3.1 名词释义

《现代汉语词典》对“韧性”的释义是：物体受外力作用时，产生变形而不易折断的性质。《辞海》对“韧”的释义是：柔软而坚固。对“柔韧”的释义是：柔软而有韧性。《汉英词典》^[87]对“韧性”的英文翻译是：toughness, tenacity。《英汉双解大词典》对“tough”的释义是：hard to break, cut, tear, or chew(难以破裂、切割、撕开或嚼碎)。

在物理学概念中，“韧性”表示材料在塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力；韧性越好，则发生脆性断裂的可能性越小。在材料科学及冶金学上^[88]，“韧性”是指材料受到使其发生形变的力时对折断的抵抗能力，其定义为材料在破裂前所能吸收的能量与体积的比值。

3.2 电力系统韧性研究背景

目前，电力系统中各种持续的随机扰动不断增多，包括新能源的随机扰动、新负荷的随机扰动等。如果将电力系统比喻成大桥，这些随机扰动就好比刮过大桥的风浪。经过长期的风吹浪打，大桥不能被折断、撕裂。而电力系统也有这样的要求，为此，笔者提出“电力系统韧性”(power grid toughness)概念：电力系统在持续的随机扰动之下，不发生崩溃、解列而保持正常运行的能力。

笔者认为，从电力系统角度，“电力系统柔性”比较偏重于描述灵活调节的能力，“电力系统弹性”比较偏重于描述抗击极端事件的能力，“电力系统韧性”比较偏重于描述耐受持续随机扰动的能力。“电力系统韧性”与“电力系统安全性”、“电力系统稳定性”有一定联系，但又有明显区别。“电力系统安全性”是一个很大的概念集合，“电力系统稳定性”是其中的一个子集，而“电力系统韧性”是其中的另一个子集。需要指出的是，以往也有电力系统文献中采用“韧性”一词^[89]，但只是英文resilience的另一种翻译，实际内涵还是本文所述“弹性”而非本文所述“韧性”。另外，与“电力系统韧性”比较相关的是“电力系统脆弱性”，区别在于：一是前者从正面描述电力系统抗扰动能力，后者从反面描述电力系统抗扰动能力；二是前者中扰动是经常性的连续随机扰动，后者中扰动往往是一次性的故障事件。上述概念之

间的关系,如表1所示。

表1 名词比较
Table 1 Noun comparison

名词	面向场景	主要内涵
电力系统柔性	电力系统变化	灵活可调
电力系统弹性	电力系统极端事件	快速恢复
电力系统脆弱性	电力系统故障	识别脆弱
电力系统韧性	电力系统随机扰动	难以撕裂

3.3 电力系统韧性研究框架

开展电力系统韧性研究,需要从顶层考虑其研究框架和技术路线。总体而言,“电力系统韧性”的研究内容如图3所示。

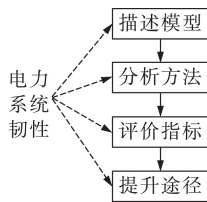


图3 电力系统韧性

Fig.3 Power system toughness

(1)描述模型。电力系统经受着随机扰动,这种扰动时刻存在着。以往由于这种扰动很小,都将其列入电力系统小扰动稳定性范畴,采用线性化、确定的微分-代数方程组描述。然而,目前这种扰动日益变多、变大,需要采用非线性、随机的微分-代数方程组描述。

(2)分析方法。传统上的小扰动稳定性采用特征根方法进行分析,以此判断稳定性。而对于“电力系统韧性”研究,特征根分析方法无法适用于非线性随机的微分-代数方程组。为此,需要借鉴数学、力学领域的分析方法。

(3)评价指标。传统上的小扰动稳定性,可以通过计算获得极限功率(或极限电压)及其对应的储备系数,以此作为评价指标。而对于“电力系统韧性”研究,面对随机性激励需要采用统计性评价指标。类比于材料学科“韧性”的定义,“材料所能吸收的能量”,可以视为电力系统所能接受的临界系统能量等描述电力系统最大能力的指标;“材料体积”则对应于电力系统的总容量、空间分布、互联程度等可以提高电力系统承受能力的指标。因此,描述“电力系统韧性”的指标可能不尽一致,需要开展深入研究。

(4)提升途径。对于实际电力系统而言,需要判断“电力系统韧性”是否满足工程需要,如果不满足则需要加以提升。因此,需要研究提升“电力系统韧性”的举措。

“电力系统韧性”的研究技术路线如图4所示。

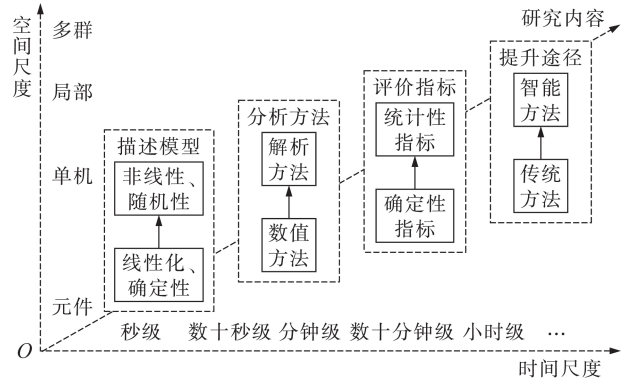


图4 电力系统韧性研究路线

Fig.4 Research roadmap of power system toughness

4 结语

本文首先综述电力系统柔性的研究背景、指标及评价方法,接着综述电力系统弹性的研究背景、研究框架及策略。由于“柔性”偏重于描述灵活可调的能力,“弹性”比较偏重于描述抗击极端事件的能力。这2个概念不能很好地描述电力系统中持续性的随机扰动对系统的影响。为此,本文提出“电力系统韧性”的概念,即电力系统耐受持续的随机扰动的能力。给出关于“电力系统韧性”的研究框架、技术路线以及研究内容的建议。

参考文献:

- [1] 中国社会科学院词典编辑室. 现代汉语词典[M]. 修订本. 北京:商务印书馆,1996:376-377.
- [2] 辞海编辑委员会. 辞海[M]. 6版,缩印本. 上海:上海辞书出版社,2010:1-20.
- [3] 词典编写组. 英汉双解大词典[M]. 北京:外语教学与研究出版社,2005:150-155.
- [4] 《中国电力百科全书》编辑委员会. 中国电力百科全书[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2014:268-269.
- [5] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京:能源基金会,2015.
- [6] North American Electric Reliability Corporation. Special report: accommodating high levels of variable generation[R]. Princeton, New Jersey, USA: North American Electric Reliability Corporation, 2009.
- [7] HOLTINEN H, TUOHY A, MILLIGAN M, et al. The flexibility workout: managing variable resources and assessing the need for power system modification[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(6): 52-62.
- [8] ZHAO J, ZHENG T, LITVINOV E. A unified framework for defining and measuring flexibility in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(1): 1-9.
- [9] 肖定奎, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1569-1576.
- [10] XIAO Dingui, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. A review of power system flexibility and its evaluation[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576.
- [10] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility planning and challenges for power systems with a high proportion of re-

- wable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):147-158.
- [11] HEINEN S. Unleashing the flexibility of gas: innovating gas systems to meet the electricity system's flexibility requirements[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1): 16-24.
 - [12] KIVILUOMA J. Harnessing flexibility from hot and cold: heat storage and hybrid systems can play a major role[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1):25-33.
 - [13] CASEY E, BEAINI S, PABI S, et al. The triple bottom line for efficiency: integrating systems within water and energy networks[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1): 34-42.
 - [14] HAESELEER W D, VRIES L D, KANG C, et al. Flexibility challenges for energy markets: fragmented policies and regulations lead to significant concerns[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1):61-71.
 - [15] ANESE E D, MANCARELLA P, MONTI A. Unlocking flexibility: integrated optimization and control of multienergy systems[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1):43-52.
 - [16] SCHUITEMA G, RYAN L, ARAVENA C. The consumer's role in flexible energy systems: an interdisciplinary approach to changing consumers' behavior[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(1):53-60.
 - [17] ULBIG A. Operational flexibility in electric power systems [D]. Zurich, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology, 2014.
 - [18] ULBIG A, ANDERSSON G. Role of power system flexibility, renewable energy integration: practical management of variability and uncertainty and flexibility in power grids[M]. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2014:227-238.
 - [19] HOBBS B F, HONIOUS J C, BLUESTEIN J. Estimating the flexibility of utility resource plans: an application to natural gas cofiring for SO₂ control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(11):167-173.
 - [20] MANGESIUS H, HIRCHE S, HUBER M, et al. A framework to quantify technical flexibility in power system based on reliability certificates[C]//The 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Kongens, Denmark: IEEE, 2013:1-5.
 - [21] LANNOYE E, FLYNN D, MALLEY M O. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):922-931.
 - [22] LANNOYE E, FLYNN D, MALLEY M O. Assessment of power system flexibility: a high-level approach[C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, California, USA: IEEE, 2012:1-8.
 - [23] MILLIGAN M, FREW B, ZHOU E, et al. Advancing system flexibility for high penetration renewable integration[R]. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2015.
 - [24] BRESESTI P, CAPASSO A, FALVO M C, et al. Power system planning under uncertainty conditions: criteria for transmission network flexibility evaluation[C]//IEEE Power Tech Conference. Bologna, Italy: [s.n.], 2003:1-6.
 - [25] CAPASSO A, FALVO M C, LAMEDICA R, et al. Power system planning: evaluation of a transmission network flexibility index [C]//International Conference on Applied Simulation and Modelling. Rhodes, Greece: [s.n.], 2004:1-8.
 - [26] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. 2nd ed. New York, USA: Plenum Press, 1984:172-176.
 - [27] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电力, 2000, 33(3):30-31.
CHEN Shuyong, DAI Huizhu, BAI Xiaomin, et al. Stochastic production simulation of power system with wind farm[J]. Electric Power, 2000, 33(3):30-31.
 - [28] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28):34-39.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Stochastic production simulation of power system with wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28):34-39.
 - [29] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22):26-31.
ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Evaluation of system peak adjustment adequacy after large-scale wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 26-31.
 - [30] 邹斌, 李冬. 基于有效容量分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7):23-31.
ZHOU Bin, LI Dong. Stochastic production simulation of power system including wind farm based on effective capacity distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):23-31.
 - [31] 谈天夫, 高山, 李海峰, 等. 基于等效间隔-频率分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 148-157.
TAN Tianfu, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Stochastic production simulation of power system with wind farm based on equivalent interval-frequency distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12):148-157.
 - [32] LANNOYE E, FLYNN D, MALLEY M O. Transmission, variable generation, and power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):57-66.
 - [33] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):200-209.
 - [34] ORTEGA-VAZQUEZ M A, KIRSCHEN D S. Estimating the spanning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1):114-124.
 - [35] PAPAVALIOU A, OREN S S, O'NEILL R P. Reserve requirements for wind power integration: a scenario-based stochastic programming framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(26):2197-2206.
 - [36] MATOS M, BESSA R J. Setting the operating reserve using probabilistic wind power forecasts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2):594-603.
 - [37] WANG Y, XIA Q, KANG C. Unit commitment with volatile node injections by using interval optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3):1705-1713.
 - [38] YONG T, YAO J, YANG S, et al. Ramp enhanced unit commitment for energy scheduling with high penetration of renewable generation[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Denver, Colorado, USA: [s.n.], 2015:1-5.
 - [39] ABDUL-RAHMAN K H, ALARIAN H, ROTHLEDER M, et al. Enhanced system reliability using flexible ramp constraint in CASIO market[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, California, USA: [s.n.], 2012:1-5.
 - [40] MARNERIS I G, BISKAS P N, BAKIRTZIS E A. An integrated scheduling approach to underpin flexibility in European power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2):647-657.
 - [41] NAVID N, ROSENWALD G. Market solutions for managing ramp flexibility with high penetration of renewable resource[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4):784-790.
 - [42] ELA E, O'MALLEY M. Scheduling and pricing for expected ramp capability in real-time power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3):1681-1691.
 - [43] WU H, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Thermal generation flexibility with ramping costs and hourly demand response in stochastic security-constrained scheduling

- of variable energy sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):2955-2964.
- [44] SCHULLER A, FLATH C M, COTTWALT S. Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration[J]. Applied Energy, 2015, 151:335-344.
- [45] CUTTER E, HALEY B, HARGREAVES J, et al. Utility scale energy storage and the need for flexible capacity metrics[J]. Applied Energy, 2014, 124:274-282.
- [46] SWIDER D J. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):95-102.
- [47] JIANG R, WANG J, GUAN Y. Robust unit commitment with wind power and pumped storage hydro[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):800-810.
- [48] DANESHI H, SRIVASTAVA A K. Security-constrained unit commitment with wind power generation and compressed air energy storage[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(2):167-175.
- [49] BLACK M, STRBAC G. Value of bulk energy storage for managing wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):197-205.
- [50] Department of Energy. Insurance as a risk management instrument for energy infrastructure security and resilience[R/OL]. [2018-12-20]. <http://energy.gov/oe/downloads/insurance-risk-management-instrument-energy-infrastructure-security-and-resilience>.
- [51] International Energy Agency. RD & D needs for energy system climate preparedness and resilience[R/OL]. [2018-12-20]. <https://www.iea.org/media/workshops/2013/egrdutrecht/WorkshopSummaryNov2013.pdf>.
- [52] Executive Office of the President. Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages[R/OL]. [2018-12-20]. <http://energy.gov/downloads/economic-benefits-increasing-electric-grid-resilience-weather-outages>.
- [53] The National Academy of Sciences. Disaster resilience: a national imperative[M]. Washington, DC, USA: National Academies Press, 2012:5-10.
- [54] North American Electric Reliability Corporation. High-impact, low-frequency event risk to the North American Bulk Power System[R/OL]. [2018-12-20]. <http://www.nerc.com/pa/CI/Resources/Documents/HILF%20Report.pdf>.
- [55] North American Electric Reliability Corporation. Severe impact resilience: considerations and recommendations[R/OL]. [2018-12-20]. http://www.nerc.com/docs/oc/sirtf/SIRTF_Final_May_9_2012-Board_Accepted.pdf.
- [56] North American Electric Reliability Corporation. Electricity subsector coordinating council: critical infrastructure strategic roadmap[R/OL]. [2018-12-20]. <http://www.nerc.com/pa/CI/Pages/ESCC.aspx>.
- [57] Electric Power Research Institute. Enhancing distribution resiliency: opportunities for applying innovative technologies[R/OL]. [2018-12-20]. <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001026889>.
- [58] VENKATA S S M, HATZIARGYRIOU N. Grid resilience: elasticity is needed when facing catastrophes[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):16-23.
- [59] TON D T, WANG W P. A more resilient grid: the U.S. department of energy joins with stakeholders in an R&D plan[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):26-34.
- [60] STRBAC G, HATZIARGYRIOU N, LOPES J P, et al. Microgrids: enhancing the resilience of the European Megagrid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):35-43.
- [61] MARNAY C, AKI H, HIROSE K, et al. Japan's pivot to resilience: how two microgrids fared after the 2011 earthquake[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):44-57.
- [62] 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):458-66.
- [63] SHAHIDEHPOUR M, BARTUCCI C, PATEL N, et al. Streetlights are getting smarter: integrating an intelligent communications and control system to the current infrastructure[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):67-80.
- [64] VARELA J. The best of IGREENGrid practices: a distribution network's contribution to resiliency[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):81-89.
- [65] National Infrastructure Advisory Council. A framework for establishing critical infrastructure resilience goals[R/OL]. [2018-12-20]. <https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/niac/niac-a-framework-for-establishing-critical-infrastructure-resilience-goals-2010-10-19.pdf>.
- [66] Cabinet Office. Natural hazards and infrastructure[R/OL]. [2018-12-20]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/61342/naturalhazards-infrastructure.pdf.
- [67] ZHOU Y, PAHWA A, YANG S S. Modeling weather-related failures of overhead distribution lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4):1683-1690.
- [68] BOLLEN M H J. Effects of adverse weather and aging on power system reliability[C]//IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Clearwater, FL, USA: IEEE, 2000:63-68.
- [69] LIU Y, SINGH C. Evaluation of hurricane impact on failure rate of transmission lines using fuzzy expert system[C]//International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. Curitiba, Brazil: [s.n.], 2009:1-6.
- [70] DAWSON R, HALL J. Adaptive importance sampling for risk analysis of complex infrastructure systems[J]. Proceedings of the Royal Society, 2006, 462:3343-3362.
- [71] CASCIATI F, FARAVELLI L. Fragility analysis of complex structural systems[M]. Taunton, UK: Research Studies Press, 1991:50-100.
- [72] ELSNER J B, JAGGER T H. A hierarchical Bayesian approach to seasonal hurricane modeling[J]. Journal of Climate, 2004, 17:2813-2827.
- [73] VICKERY P J, TWISDALE L A. Prediction of hurricane wind speeds in the United States[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11):1691-1699.
- [74] CHEN L, ZHANG H, WU Q. A numerical approach for hybrid simulation of power system dynamics considering extreme icing events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):5038-5046.
- [75] MA S, CHEN B, WANG Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):1442-1451.
- [76] LEI S, WANG J, 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.
- [77] WANG C, HOU Y, QIN Z, et al. Dynamic coordinated condition-based maintenance for multiple components with external conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5):2362-2370.

- [78] ARAB A, KHODAEI A, KHATOR S K, et al. Stochastic hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1046-1054.
- [79] 张鑫,王楠,王伟,等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估[J/OL]. 电力系统及其自动化学报. [2019-03-09]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000240>.
- [80] 顾明宏,孙为兵,李培培,等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 103-109.
GU Minghong, SUN Weibing, LI Peipei, et al. Evaluation index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2018, 30(7): 103-109.
- [81] WANG C, HOU Y, QIU F, et al. Resilience enhancement with sequentially proactive operation strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2847-2857.
- [82] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2913-2922.
- [83] WANG Z, WANG J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3139-3149.
- [84] HOU Y, LIU C C, SUN K, et al. Computation of milestones for decision support during system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1399-1409.
- [85] ARIF A, MA S, WANG Z, et al. Optimizing service restoration in distribution systems with uncertain repair time and demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6828-6838.
- [86] ARIF A, WANG Z, WANG J, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.
- [87] 《汉英词典》编写组. 汉英词典[M]. 北京:商务印书馆, 1980: 1157-1158.
- [88] 郑宇轩. 韧性材料的动态碎裂特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
ZHENG Yuxuan. Study on dynamic fracture characteristics of ductile materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [89] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-7.
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution network toughness and related research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-7.

作者简介:



鞠平

鞠平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模与控制(E-mail: pju@hhu.edu.cn);

王冲(1988—),男,江苏宿迁人,副教授,博士,主要研究方向为综合能源电力系统的建模及优化、电力系统弹性策略、电力系统随机优化等(E-mail: chongwang@hhu.edu.cn);

辛焕海(1981—),男,江西萍乡人,教授,博士,主要研究方向为交直流系统稳定性分析与控制、新能源并网稳定性分析与控制等(E-mail: xinhh@zju.edu.cn);

李洪宇(1990—),男,河南南阳人,博士,主要研究方向为随机因素下电力系统分析(E-mail: lihongyu@hhu.edu.cn);

江道灼(1960—),男,福建闽侯人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术(E-mail: dzjiang@zju.edu.cn);

沈赋(1988—),男,云南昆明人,博士,主要研究方向为综合能源电力系统建模(E-mail: shenfu@hhu.edu.cn)。

Flexibility, resilience and toughness of power system

JU Ping^{1,2}, WANG Chong², XIN Huanhai¹, LI Hongyu², JIANG Daozhuo¹, SHEN Fu²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The research progress of power system flexibility and resilience is reviewed, it is pointed out that “flexibility” emphasizes on describing the flexibility and adjustability of power system, while “resilience” emphasizes on describing the ability of power system to resist extreme events. Along with the continuous increase of persistent stochastic disturbances in power system, “flexibility” and “resilience” neither can describe the tolerance ability of power system to persistent stochastic disturbances, for which, the concept of “power system toughness” is proposed, i.e. the ability of power system to maintain normal operation without collapse or disconnection under persistent stochastic disturbances, and the research contents and technical routes are given, including description models, analysis methods, evaluation indexes, promotion ways and so on.

Key words: electric power systems; flexibility; resilience; toughness