

# 电力系统运行和基础设施弹性的度量和量化

Mathaios Panteli, *IEEE*会员, Pierluigi Mancarella, *IEEE*高级会员, Dimitris N. Trakas, *IEEE*学生会会员, Elias Kyriakides, *IEEE*高级会员, 和 *IEEE*研究员 Nikos D. Hatziargyriou

**摘要**-对高影响低概率事件的恢复能力正受到越来越多的关注,例如解决极端天气对全球关键基础设施的影响。然而,到目前为止,还没有明确的方法或一套指标来量化电力系统背景以及运营和基础设施完整性方面的弹性。因此,在本文中,引入了弹性“梯形”,它扩展了传统上用于现有研究的再弹性“三角形”,以便考虑电力系统在极端事件期间可能经历的不同阶段。然后使用时间相关的弹性指标对弹性梯形进行量化,这些指标是专门引入的,以帮助捕获与事件的不同时间阶段的梯形相关的关键系统退化和恢复特征。此外,我们引入了操作弹性和基础设施弹性的概念,以获得系统响应的额外见解。然后,使用提出的评估框架分析不同的结构和运行弹性增强策略,考虑到袭击29总线大不列颠输电网络测试案例的单一和多个严重风暴事件。结果清楚地强调了所提出的框架和指标在量化电力系统弹性和相关增强策略方面的能力。

**索引术语**——关键基础设施、极端天气、高冲击低概率事件、电力系统弹性、电力系统弹性。

## I. 介绍

在过去的几十年里,极端天气对全球电力系统的影响越来越明显。这些事件通常被归类为高影响事件

稿件收到2016年8月10日;2016年12月6日改稿;2017年1月27日接受。发表日期2017年2月6日;当前版本日期2017年10月18日。M. Panteli和P. Mancarella的工作部分得到了英国EPSRC通过“RESNET”(EP/I035757/1)和“电力系统的灾害管理和恢复力”(EP/N034899/1)项目的支持。纸没有。tpwrs - 01209 - 2016。

M. Panteli, 曼彻斯特大学电子电气工程学院, 曼彻斯特M13 9PL, 英国 (e-mail: mathaios). panteli@manchester.ac.uk)。

P. Mancarella就任职于澳大利亚维克3010帕克维尔墨尔本大学电气与电子工程系, 以及英国曼彻斯特M13 9PL曼彻斯特大学电子电气工程学院(电子邮件: p.mancarella@manchester.ac.uk)。

D. N. Trakas和N. D. Hatziargyriou就职于雅典国立技术大学, 雅典15773, 希腊(e-mail: dtrakas@power.ece.ntua.gr;nh@power.ece.ntua.gr)。

E. Kyriakides就任职于塞浦路斯大学电气与电子工程系, 尼科西亚1678, 塞浦路斯(电子邮件: elias@ucy.ac.cy)。

本文中一个或多个数字的彩色版本可在<http://ieeexplore.ieee.org>上在线获取。

数字对象标识符10.1109/TPWRS.2017.2664141

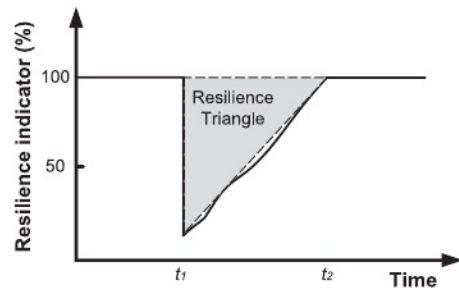


图1所示。弹性三角形[2]。

低概率事件,因为它们的频率可能相对较低,但它们的影响可能极高。

c.s. Holling于1973年[1]首次尝试对生态系统的弹性进行定义,在此基础上,不同学科中出现了各种定义,如社会系统[3]、社区[4]、经济[5]和卫生系统[6]。尽管这些定义之间存在细微差异,但在任何学科(包括电力系统)中,弹性的概念通常都可以被视为系统预测和承受外部冲击、尽快恢复到冲击前状态并适应以更好地为未来灾难性事件做好准备的能力。定义和理解电力系统对此类灾难性事件的弹性最近引起了几位研究人员的兴趣[7]-[9]。近年来已经开展了几项以弹性为导向的研究[10]-[17],包括建模技术和弹性增强策略。此外,与传统的可靠性指标(如负荷损失频率(LOLF)和负荷损失预期(LOLE))不同,人们提出了各种具体量化弹性的指标。例如,在[10]、[11]、[15]中,弹性被量化为真实性能曲线与目标性能曲线之间的面积之比。在[12]中,系统弹性是用从中断状态中恢复的交付函数的比例来衡量的,而在[13]中,弹性是用完全功能系统的容量与事后容量之间的差来衡量的。

图1所示的所谓的“弹性三角”[2]在大多数研究中都是建模的,尽管基础设施的不同性能响应曲线也被普遍讨论过(例如在[10]和[12]中)。三角形斜边的形状可以变化,例如线形、三角形或

指数型[14], 这取决于适当的恢复策略的有效性。然而, 尽管这种方法可以有效地捕获事件( $t \in [t_1, t_2]$ )后的弹性恢复, 但它无法捕获典型电力系统可能经历的其他高度关键的弹性维度, 例如, 一旦事件击中关键基础设施, 弹性退化的速度有多快, 或者基础设施在开始恢复之前和完全完成恢复之前保持在一个或多个事件后退化状态的时间有多长。因此, 它无法在事件的所有阶段提供关键基础设施的恢复能力水平的完整图像。此外, 它不允许评估在每个阶段中不同的适应和恢复力增强策略的贡献。从运营角度和基础设施角度来看, 可能会实现不同水平的恢复力, 不同的选择将对两者产生不同的影响(和成本), 这也可以看出这一点。能够定量捕捉所有这些复杂性的相关指标也缺失了。最后, 现有的工作主要侧重于评估关键基础设施对单一天气事件的恢复能力。然而, 正如最近的重大灾害所证明的那样, 多个事件可能会在短时间内袭击基础设施, 导致恢复能力进一步退化。

在本文中, 提出了一个新的弹性量化框架, 围绕弹性梯形的概念构建, 该概念描述了包括电力系统在内的关键基础设施在事件期间可能处于的所有阶段, 以及这些状态之间的过渡。在以前的作品中(例如[10], [12], [15])已经提供了与该梯形类似的曲线, 但尚未充分和系统地建模或量化。本工作提出了基于不同指标的时间依赖的运营和基础设施弹性指标, 以量化这种多阶段弹性梯形和相关的弹性指标, 即, 当天气事件袭击电力系统时, 弹性下降有多低和多快, 它停留在事件后退化状态的时间有多长, 以及恢复到事件前状态的速度有多快, 从而能够对实际的, 受极端事件影响的基础设施的时间依赖行为, 并确实区分了运营和基础设施的影响。然后, 在这四个指标的基础上并加以综合, 梯形面积也被用作补充性的定量指标, 用于获取有关基础设施弹性性能和各种弹性增强策略效果的额外信息。

在不失通用性的前提下, 考虑极端天气事件<sup>1</sup>, 利用易损性曲线获得电力系统部件随时间和天气变化的故障概率, 对评估框架进行了举例说明。对英国(GB)输电测试网络进行了几个案例研究[18], 以量化运营和基础设施的弹性以及使用增强策略的效果

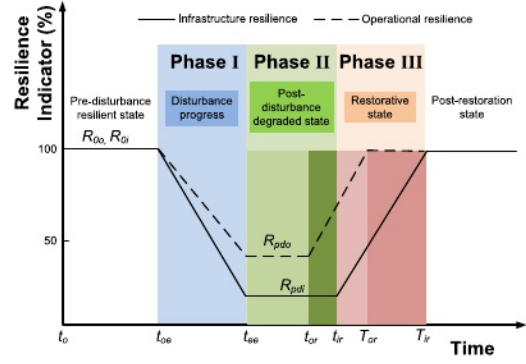


图2所示。多相弹性梯形。

提出的弹性度量框架。此外, 当遭受单次和多次连续风暴时, 对网络弹性进行量化, 以便更好地了解此类灾难性事件的影响。

本文的其余部分组织如下。第二节介绍了提出的弹性量化框架。第三节简要概述了脆弱性建模和模拟过程。第四节介绍了使用GB传输网络的29总线测试版本的不同案例研究应用。最后, 第五节对本文进行总结。

## II. 电力系统弹性评估的定量方法和指标

本节将讨论多相弹性梯形, 以及本研究中用于量化电力系统运行和基础设施弹性的随时间弹性度量和指标。

### A. 与事件相关的多相弹性梯形

图2显示了多相弹性梯形<sup>2</sup>, 其中用于量化事件期间电力系统弹性水平的弹性指标显示为时间的函数。此外, 还描述了运营和基础设施的弹性, 如稍后讨论的那样, 使用不同的指标对其进行量化。运行弹性, 顾名思义, 是指确保电力系统运行强度的特征, 例如, 在面对灾难时确保向客户不间断供电或发电能力可用性的能力。基础设施弹性是指电力系统的物理强度, 用于减轻系统损坏, 崩溃或总体上变得无法正常运行的部分。

在图2中, 我们认为在事件发生前, 用于表示和量化扰动前弹性状态下的运行和基础设施弹性水平的弹性指标(分别为 $r_0$ 和 $R_{0i}$ )为100%,

<sup>1</sup> Severe windstorms with varying intensities hitting transmission networks are used as an illustrative case study, but any (weather) event could be used if the relevant data are available.

<sup>2</sup> A linear approximation for the transitions between the resilience levels/states during the event is used for demonstration purposes; however, in reality, these state transitions can have any shape depending on the network constraints and prevailing conditions, and the impact of the event that hits the network.

例如, 100%的需求和100%的输电线路分别在线。然而, 必须澄清的是, 这些弹性水平可能有所不同。

在图2的弹性梯形中可以清楚地看到三个阶段, 即:

- 1)阶段I, 扰动进程( $t \in [t_{oe}, t_{ee}]$ ), 在事件脚趾的时间和事件tee的结束之间,
- 2)第二阶段, 事件结束后和恢复启动前的扰动后退化状态(分别为运营和基础设施弹性 $t \in [t_{ee}, t_{or}]$ 和 $t \in [t_{ee}, t_{ir}]$ ), 以及
- 3)第三阶段, 恢复状态(分别为运营和基础设施恢复 $t \in [t_{or}, t_{tr}]$ 和 $t \in [t_{ir}, t_{tr}]$ )。

在[8]中给出了弹性电力系统在这些阶段有效响应所必须具备的特征。

在第一阶段, 弹性水平分别从扰动前的弹性 $r_0$ 和 $R_{0i}$ 下降到扰动后的基础设施弹性 $R_{pdi}$ 和扰动后的运维弹性 $R_{pdo}$ 。必须注意的是,  $R_{pdo}$ 可能低于或高于 $R_{pdi}$ , 这取决于系统和攻击网络的事件的严重程度。因此, 它是系统和事件特定的。

在阶段II中, 系统处于扰动后降级的运行和基础设施状态(即分别为 $R_{pdo}$ 和 $R_{pdi}$ )一段时间, 然后分别在1点和3点启动运行和基础设施恢复。这段时间的持续时间可能因基础设施和运行弹性的不同而不同, 具体取决于弹性解决方案, 例如, 智能运营解决方案可能比基础设施恢复更快地启动负载恢复(即运行弹性), 这是一种理想的情况。

同样, 第三阶段可以分为两个子阶段:运营恢复,  $t \in [t_{or}, t_{tr}]$ , 和基础设施恢复,  $t \in [t_{ir}, t_{tr}]$ 。正如将在案例研究应用程序中说明的那样, 并且在现实中的大多数情况下, 运营弹性的恢复速度要快于基础设施弹性。例如, 在受影响的基础设施组件(例如, 倒塌的输电线路或塔, 淹没的变电站等)完全恢复之前, 客户可能会完全重新连接。这也是为什么区分运营弹性和基础设施弹性以及独立评估这些概念并使用不同指标来捕捉其独特特征至关重要的另一个原因。

## B. $\Phi\Lambda E\Pi$ 弹性量化度量框架

为了量化电力系统的弹性, 定义一组能够在弹性梯形的不同阶段捕获其性能的指标至关重要。表1给出了本文提出的用于表征弹性梯形的关键弹性指标, 特别是考虑到运营和基础设施重新考虑, 第一阶段弹性下降有多快( $\Phi$ )和多低( $\Lambda$ ),事件后退化状态有多广泛( $E$ )以及网络恢复到事件前弹性状态(III)的速度有多快( $\Pi$ )

表我  
 $\Phi\Lambda E\Pi$ 弹性度量体系

Phase	State	Resilience metric	Symbol
I	Disturbance progress	How fast resilience drops? How low resilience drops?	$\Phi$ $\Lambda$
II	Post-disturbance degraded	How extensive is the post-disturbance degraded state?	$E$
III	Restorative	How promptly does the network recover?	$\Pi$

表二世  
弹性指标的数学公式

Metric	Mathematical Expression		Measuring Unit	
	Operational	Infrastructure	Operational	Infrastructure
$\Phi$	$\frac{R_{pdo} - R_{0o}}{t_{ee} - t_{oe}}$	$\frac{R_{pdi} - R_{0i}}{t_{ee} - t_{oe}}$	MW/hours	Number of lines tripped/hours
$\Lambda$	$R_{0o} - R_{pdo}$	$R_{0i} - R_{pdi}$	MW	Number of lines tripped
$E$	$t_{or} - t_{ee}$	$t_{ir} - t_{ee}$	Hours	Hours
$\Pi$	$\frac{R_{0o} - R_{pdo}}{T_{or} - t_{or}}$	$\frac{R_{0i} - R_{pdi}}{T_{ir} - t_{ir}}$	MW/hours	Number of lines restored/hours
Area	$\int_{t_{oe}}^{T_{or}} R_{op}(t) dt$	$\int_{t_{oe}}^{T_{ir}} R_i(t) dt$	MW $\times$ hours	(Number of lines in service) $\times$ hours

每个阶段的沉默。这一组四个指标在这项工作中被定义为 $\Phi\Lambda E\Pi$ 弹性指标系统(“ $\Phi\Lambda E\Pi$ ”的发音类似于“FLEP” )。

如表2所示, 第一阶段的 $\Phi$ -metric通过估计事件期间恢复力退化的斜率来评估(其中 $t_{ee} - t_{oe}$ 为风暴持续时间, 即 $t_{windstorm}$ ), 而 $\Lambda$ -metric由恢复力退化水平定义, 即基础设施和运行恢复力的 $R_{0i} - R_{pdi}$ 和 $r_0 - R_{pdo}$ 。显示网络保持在扰动后退化状态(阶段II)的时间的 $E$ -metric分别由 $t_{or} - t_{ee}$ 和 $t_{ir} - t_{ee}$ 给出, 分别代表运营和基础设施的恢复能力。第三阶段的 $\Pi$ -metric由运行和基础设施恢复曲线的斜率定义, 该曲线考虑了原始的事件前<sup>3</sup>恢复水平和达到该恢复水平所需的时间。

除了 $\Phi\Lambda E\Pi$ 弹性指标外, 还使用了一个额外的指标, 即梯形的面积。如表2所示, 面积度量将表示为事件持续时间内梯形的积分, 再次考虑到运营和基础设施的弹性。考虑图2中弹性梯形的不同阶段的分段线性(这导致阶段I和III有两个直角三角形, 阶段II有一个矩形), 对应于弹性梯形的三个阶段(I, II和III)的区域可以

<sup>3</sup> In principle, a “post-restoration” resilience level could also be defined which might differ from the original pre-disturbance level. For simplicity, here we do not explicitly deal with this aspect which can be case specific, but the proposed framework is capable to address it.



表3

线性化梯形面积的数学表达式

Trapezoid Area	Mathematical Expression	
	Operational	Infrastructure
$Area_{I}$	$\frac{\Lambda_{\text{operational}} \times t_{\text{windstorm}}}{2}$	$\frac{\Lambda_{\text{infrastructure}} \times t_{\text{windstorm}}}{2}$
$Area_{II}$	$\Lambda_{\text{operational}} \times E_{\text{operational}}$	$\Lambda_{\text{infrastructure}} \times E_{\text{infrastructure}}$
$Area_{III}$	$\frac{\Lambda_{\text{operational}} \times (T_{\text{or}} - t_{\text{or}})}{2}$	$\frac{\Lambda_{\text{infrastructure}} \times (T_{\text{ir}} - t_{\text{ir}})}{2}$

近似如表III所示。运营和基础设施弹性梯形的总面积由 $Area_I$ 、 $Area_{II}$ 和 $Area_{III}$ 的总和给出。可以看出，面积度量依赖于表1和表2中定义和数学表达的 $\Phi\Lambda E\Pi$ 度量(主要是 $\Lambda$ 和 $E$ 度量)。

可以使用不同的弹性指标来表达和量化这些弹性指标。至关重要的是，要使用既能捕捉事件期间普遍运营弹性又能捕捉基础设施弹性的指标。在本研究中，重点是评估输电网络对极端天气事件的恢复能力，以下指标为used<sup>4</sup>:

- 1) 将事件期间连接的发电容量(MW)和负荷需求(MW)作为运行弹性的指标;和
- 2) 以在线输电线路数作为基础设施弹性的指标。

基于这些指标，再弹性指标的测量单位也定义在表二中。

因此，在这项工作中提出了一组五个弹性指标，用于有效和系统地量化受外部冲击影响的电力系统的弹性。该定量弹性度量框架包括四个独立的 $\Phi\Lambda E\Pi$ 度量和依赖于 $\Phi\Lambda E\Pi$ 度量的面积度量。使用此框架对电力系统进行弹性评估将能够深入了解电力系统的弹性水平，并在弹性梯形的特定阶段被认为不足时，推动有针对性的弹性增强策略的利用，以提高系统的弹性。

### III. 极端天气下输电网络的脆弱性建模和恢复力评估

为了模拟输电网络对天气事件的脆弱性，这里使用了脆弱性曲线的概念，它将组件的失效概率表示为天气参数(例如风速)的函数。通过将每个模拟步骤的天气剖面图映射到这些曲线上，可以获得输电走廊的天气和时间相关的故障概率。图3显示了一个通用的易损性曲线，其形状随应用而变化，但它可以

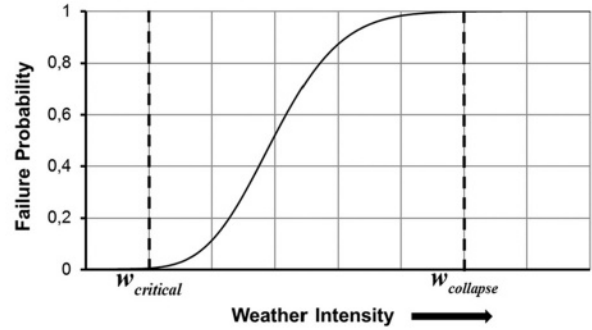


图3所示。通用易损性曲线，显示构件的失效概率作为天气强度的函数。

可表示为:

$$P(w_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } w < w_{\text{critical}} \\ P(w), & \text{if } w_{\text{critical}} \leq w < w_{\text{collapse}} \\ 1, & \text{if } w \geq w_{\text{collapse}} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $P(w_i)$ 为模拟步骤 $i$ 时组件的失效概率与天气参数 $w$ 的函数， $w_{\text{critical}}$ 为失效概率上升的天气参数值， $w_{\text{collapse}}$ 为组件一定会失效的天气参数值，即 $P_i(w) = 1$ 。如果 $P_i(w) > r$ ，传输通道将在下一个模拟步骤中跳闸，其中 $r$ 是均匀分布的随机数( $r \sim U(0,1)$ )。如果 $P_i(w) < r$ ，则走廊不会跳闸。如果发生输电走廊停电，恢复时间是随机生成的，这也是与天气有关的，稍后将讨论。

然后将走廊的天气和时间相关的运行模式馈送到基于序列蒙特卡罗模拟的引擎中，以捕获天气锋在输电网络中移动时的多时间和多空间影响。图4显示了获取依赖天气的恢复力指标和应用 $\Phi\Lambda E\Pi$ 恢复力度量框架所遵循的通用方法。值得一提的是，即使交流OPF被认为是一个合适的调度工具，对于这个特定的应用程序，重点是开发和说明一个完整的弹性量化框架，它没有考虑其他重要的相关问题，例如，例如，发电机的斜坡率。然而，所提出的工具提供了能力和灵活性，以包括对问题的附加维度建模的约束。

特别是，关于运行再弹性指标的计算，在每个模拟步骤中连接的发电容量被视为在事件期间给定主流传输网络拓扑，连通性和约束的情况下可以提供的容量。需要澄清的是，该指标不同于每个模拟步骤的发电输出。此外，为了实现交流OPF，在每个模拟步骤(允许连接负载的计算)可能发生的负载减少是使用考虑功率的负载减少最小化的目标函数来计算的

<sup>4</sup> Other similar indicators could of course also be used, depending on the specific study and objectives of the analysis.

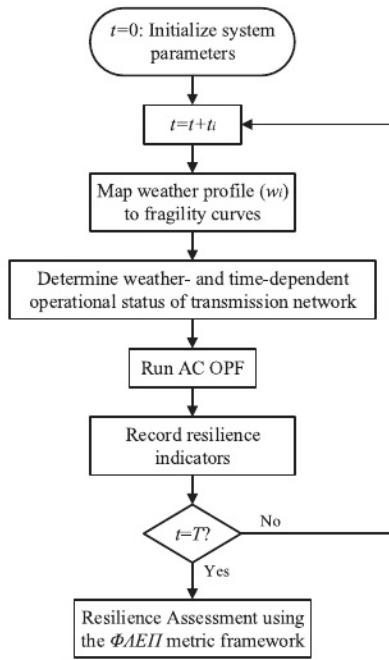


图4所示。用于评估输电网络对天气事件弹性的系统方法。

流量和网络约束，如发电和输电能力以及电压运行限制。在计算运行指标时要考虑这些产生的非线性。最后，通过记录每个模拟步骤的输电线路状态来计算基础设施弹性指标。

#### IV. 案例研究应用

本节通过对GB测试系统的各种案例研究来演示所提出的方法，以说明弹性梯形的不同方面和指标。

##### A. 测试网络和模拟数据

这里使用的是图5所示的GB传输网络的测试版，详细情况请参见[18]、[19]。在模拟中，节点需求(来源于[18]和[20])是波动的，并且是时变的，但我们假设天气事件对需求文件没有影响。然后在考虑到网络约束的情况下，通过AC OPF在每个模拟步骤调度发电以满足这一需求。

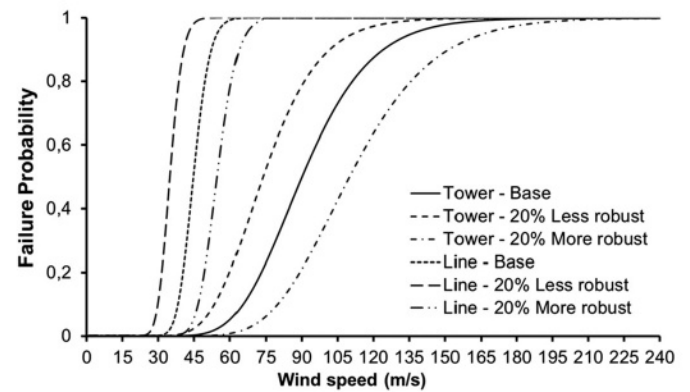
由于重点是评估风暴对输电网络弹性的影响，特别是对输电线路和塔的影响，因此需要这些组件的风脆弱性曲线。图6显示了本应用中使用的输电塔和输电线路的风易损性曲线(用于基础和鲁棒案例场景)[16]，[21]。

假设风暴持续时间为24h，时间分辨率为每小时。还假设从模拟开始的50小时开始，强烈的风暴袭击网络，并且所有组件在事件发生前都在线



图5所示。英国输电网的测试版[18]。

图6所示。基础和鲁棒情景中使用的风脆弱性曲线。



发生。GB试验网传输走廊沿线的逐时风廓线采用MERRA再分析得到，如[19]所述，该方法提供了基于卫星观测的天气数据。由于在MERRA风廓线中，可能威胁输电网络弹性的高风速是罕见的，因此通过对整个风廓线使用适当的乘法因子来放大这些风速。其中，生成了3个风暴廓线，最大风速 $w_{max}$ 分别为40 m/s、50 m/s和60 m/s(文中分别为 $WS_{40m/s}$ 、 $WS_{50m/s}$ 和 $WS_{60m/s}$ )，根据英国气象局的Beaufort风力尺度[22]，这3个廓线代表飓风。遵循这种方法是为了对测试网络可能遇到的最坏情况进行建模。

假定输电线路和输电塔的平均修复时间分别为10小时和50小时。根据输电线路和输电塔的 $MTTR_{normal}$ 随机修复时间(TTR)，一旦在风暴期间发生组件故障/崩溃，就会生成遵循指数分布的随机修复时间。如前所述，考虑到极端事件期间不进行修复主要是出于安全原因，因此在事件结束时派遣维修人员(从而启动TTR)。的

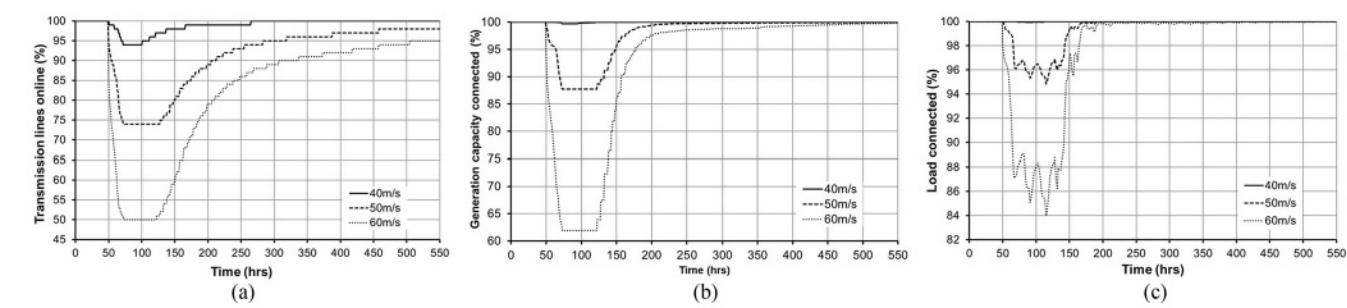


图7所示。基本情景下弹性指标作为时间的函数。a)输电线路在线(%), b)发电容量连接(%), c)负载连接(%)。

[19]给出了高风速下修复损坏部件所需时间增加的建模方法, 该方法基本上是使用高风速下的乘法因子来模拟风暴造成的更高的损坏以及接近受灾地区和修复故障部件的难度增加。

B. 对电网级风暴的恢复力评估

不同的运行和基础设施方面可能会影响电力系统在极端天气下的弹性性能。在此背景下, 已经系统地开发了几个案例研究, 以评估这些方面对测试网络弹性的影响, 因为这是量化使用并测试拟议的基于 $\Phi\Delta E\Pi$ 的弹性度量框架的适用性。特别地, 考虑了以下说明性场景:

- 1)基础:弹性梯形用IV-A节的数据和WS40 m/s、WS50 m/s和WS60 m/s的数据建模。
- 2)鲁棒性:在这种情况下, 通过调整易损性曲线, 使输电线路和塔对风暴的鲁棒性提高20%, 鲁棒性降低20%(见图6)。
- 3)响应:与稳健情景一样, 通过将输电线路和塔的 $MTTR_{normal}$ 降低和增加20%, 对天气事件的响应性提高20%和降低20%。
- 4)资源:一个关键方面是资源的数量, 即维修人员(rc), 用于在天气事件期间快速有效地响应倒塌的组件。因此, 在这种情况下, 评估了无限数量的修理人员, 5,10和15的效果。考虑到每条损坏的输电走廊需要一个维修人员, 这就引入了同时可以维修的走廊数量的限制。

还假设在事件发生期间不进行修复(即 $t \in [toe, tee]$ )。这些案例场景是基于工程判断和与GB输电系统运营商国家电网的讨论。这里必须指出的是, 稳健的案例场景, 响应和资源仅适用于WS<sub>50m/s</sub>;通过将场景应用于其他风暴可以得到类似的结论。

1)获取随时间变化的恢复力指标:图7显示了基本情景和模拟的三种风暴(WS<sub>40m/s</sub>)的随时间变化的恢复力指标

表4  
基本情况情景的 $\Phi$ -Metric

Event	Resilience Indicator		
	Trans. lines	Gen. Connected	Load Connected
WS <sub>40 m/s</sub>	-0.2500	-0.0125	-0.0024
WS <sub>50 m/s</sub>	-1.0833	-0.521	-0.249
WS <sub>60 m/s</sub>	-2.0833	-1.5876	-0.6668

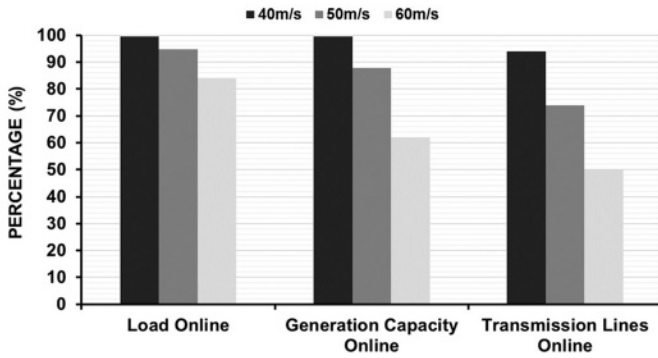
WS<sub>50m/s</sub>和WS<sub>60m/s</sub>。这些曲线的形状清晰地回忆起图2的弹性梯形, 使其能够正确建模和量化;也就是说, 可以清楚地区分三个阶段:扰动进展、事件后退化状态和恢复阶段。第一阶段的持续时间是已知的, 等于极端事件的持续时间(即本工作中的24小时), 而第二阶段和第三阶段的持续时间将是模拟引擎的输出, 并且如稍后所示, 将取决于电力公司的应急和准备计划(即本工作中考虑的响应和rc案例研究)。一般来说, 第二阶段从事件结束(tee)开始, 并在运营和基础设施弹性开始恢复(分别为tor和tir)时结束, 例如, 当某些需求或损坏部件恢复时。同样, 第三阶段从tor和tir开始, 分别在tor和tir结束, 即当运营和基础设施弹性完全恢复时。

此外, 如图2所示, 可以观察到, 由图7(b)和(c)中的运营弹性指标得出的运营弹性退化(Rpdo)明显低于图7(a)中的基础设施弹性退化(Rpdi)。还可以看出, 发电和负荷并网的运行指标恢复速度远快于输电线路并网的基础设施指标。这证明了区分基础设施和运行弹性概念的重要性和必要性, 以及使用不同的弹性指标对其进行量化的必要性。

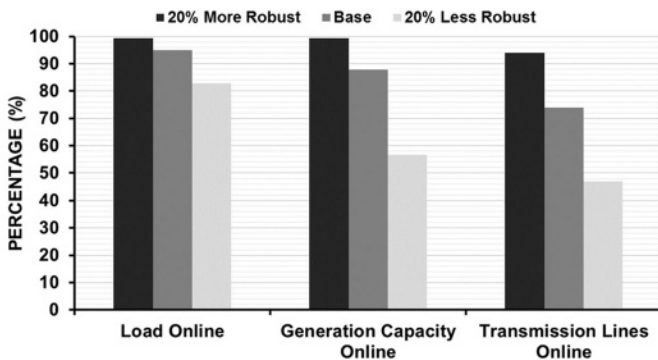
2)  $\Phi\Delta E\Pi$ 弹性度量框架的应用:基于上述弹性指标, 现在可以通过提议的指标来量化系统弹性。

要评估的第一个指标是 $\Phi$ -metric, 即运营和基础设施弹性水平降低的速度。Ta-ble IV显示了基础设施和恢复能力梯形的第一阶段恢复能力退化曲线 $\Phi$ -metric



图8所示。基本情景的 $\Delta$ -metric。表5稳健情景和 $WS_{50m/s}$ 的 $\Phi$ -Metric

Event	Resilience Indicator		
	Trans. lines	Gen. Connected	Load Connected
20% Less Robust	-2.2083	-1.8083	-0.7132
Base	-1.0833	-0.521	-0.249
20% More Robust	-0.2500	-0.0121	-0.0117

图9所示。稳健场景的 $\Delta$ -metric和 $WS_{50m/s}$ 。

运营弹性指标。随着弹性的退化，这些斜率为负。可以清楚地看到，对于所有恢复力指标来说，风速越高，退化斜率越大。此外，输电线路在线基础设施指标的坡度最大，其次是运行弹性指标。

在 $\Phi\Delta E\Pi$ 框架内评估的第二个指标是 $\Delta$ -metric，即在第一阶段恢复力下降的程度。图8显示了基本情景下的该指标，用基础设施和运行恢复力指标表示。正如预期的那样，在更高的风速下，恢复力的退化会增加。此外，如图7所示，在这里评估的所有风暴强度中，对基础设施恢复能力的影响最大。

表V显示了 $\Phi$ -metric和图9中强健场景的 $\Delta$ -metric，对于 $WS_{50m/s}$ ，这是对这些指标影响最大的场景。可以看出，增强(降低)传输走廊的鲁棒性会增加(降低)

表六世

响应案例情景的 $E$ -Metric和 $WS_{50m/s}$ 

Case study	Duration of post-event degraded state (hours)		
	Transmission lines	Generation Capacity	Load
20% More Response	44	47	48
Base	53	54	57
20% Less Response	76	80	83

表七世

在第三阶段的 $\Pi$ -Metric为响应和资源情况的情景和 $WS_{50m/s}$ 

Case Study	Resilience indicator		
	Trans. lines	Gen. Connected	Load Connected
5 RCs	0.0128	0.0060	0.0026
10 RCs	0.0137	0.0069	0.0039
15 RCs	0.019	0.0148	0.0076
20% Less Response	0.0455	0.0266	0.0111
Base	0.0578	0.0330	0.0724
20% More Response	0.0925	0.0354	0.0925

证明(恶化)第一阶段恢复力退化的坡度和水平。

表VI展示了 $WS_{50m/s}$ 的基本和响应情况下的 $E$ -metric，即扰动后退化状态(阶段II)的持续时间。结果表明，改进(resp. 对事件的反应性恶化会导致更低的(resp. 所有恢复力指标的事件后降级状态持续时间较长。此场景对阶段I的 $\Phi$ 和 $\Delta$ metrics没有影响。此外，健壮性和资源场景对 $E$ -metric没有很大影响。

在 $\Phi\Delta E\Pi$ 框架内评估的最后一个指标是 $\Pi$ -metric，即运营和基础设施弹性水平在第三阶段的恢复速度。为此，表7显示了 $WS_{50m/s}$ 的响应和资源方案的恢复斜率(健壮方案不影响该指标)。可以看出，不同的恢复斜率对应于基础设施和运营指标。此外，很明显，维修人员的限制对基础设施和运营弹性的恢复斜率的恢复能力影响最大。此外，维修人员数量越多，可以同时修复的输电走廊数量就越多，因此所有恢复能力指标的恢复斜率(即 $\Pi$ -metric)就越高。

3)面积度量的计算:基于上一小节中 $\Phi\Delta E\Pi$ 弹性框架内估计的弹性度量，接下来估计面积度量。

图10显示了不同弹性指标下 $WS_{40m/s}$ 、 $WS_{50m/s}$ 和 $WS_{60m/s}$ 的总面积度量。面积越大，受风暴的整体影响越大。因此，如上所述，对基础设施恢复能力的影响最大。此外，风速越高，面积指标也会显著增加。

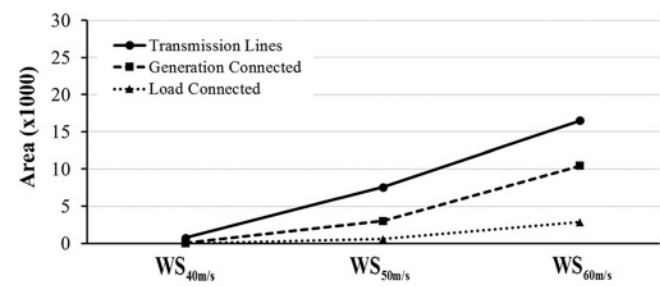


图10所示。WS40米/秒，WS50米/秒和WS60米/秒的面积度量。  
图11所示。指示器传输线的在线面积度量为WS50米/秒，用于稳健的情况场景和梯形的相位。

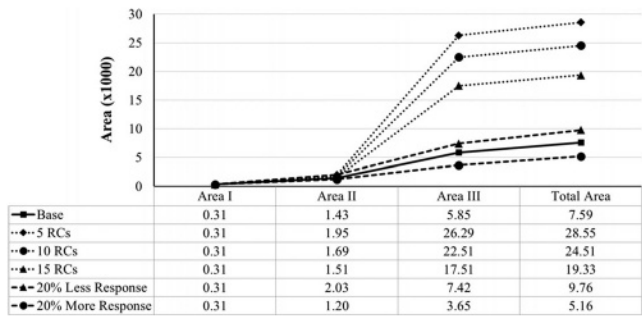
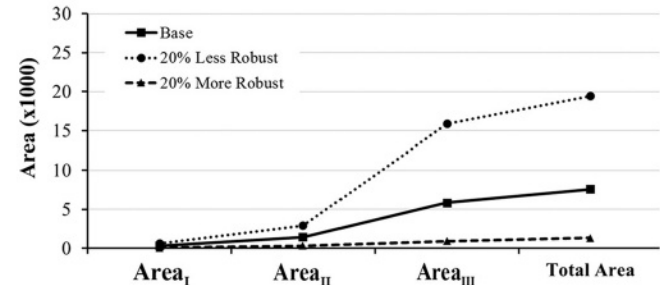


图12所示。WS50米/秒指示传输线在线面积度量。显示了案例情景基础、响应和资源(rc)的结果。

图11和图12分别显示了在WS<sub>50m/s</sub>和稳健、响应和资源(rc)情况下，使用在线输电线路指标的弹性梯形不同阶段的面积指标。在运行指标中也观察到类似的趋势。可以看出，稳健情景(图11)由于弹性退化差异较大，导致AreaII差异较大。然而，在反应和rc两种情况下，由于II期持续时间的差异较小，这种差异较低(图12)。此外，图12显示，响应和rc情景下的AreaI相等，因为这些情景下的恢复力退化是相同的;只有事件后恢复时间受到影响。还可以看出，AreaIII明显大于AreaI和AreaII。这是因为三期的持续时间比一期和二期要长得得多。此外，这是因为Total Area的值接近AreaIII的值。此外，在图12中再次显示

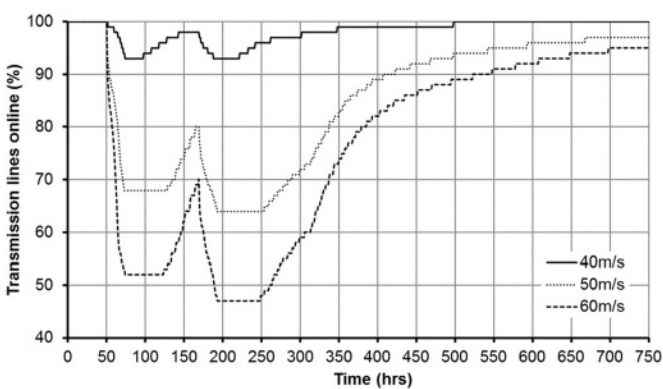


图13所示。测试系统连续遭遇两次风暴时，基本场景(风暴间隔5天)的输电线路在线(%)。  
维修人员的限制对AreaIII的影响要比响应情景高得多。

### C. 对电网规模多重风暴的恢复力评估

接下来评估测试网络在遭受两个连续事件时的弹性。为简洁起见，此处仅提供随时间变化的输电线路在线基础设施弹性指标(运行指标也有类似趋势)。完整的基于 $\Phi\Delta EII$ 的弹性度量框架可以按照与前几小节中单一天气事件相同的方法应用。

特别地，对于基本场景，首先假设测试网络受到两个相同强度的风暴(WS40 m/s, WS50 m/s和WS60 m/s)的袭击，两次事件之间间隔5天，即第一次事件在50小时施加，第二次事件在170小时施加，持续时间均为24小时。

图13显示了在线传输线(%)随时间的变化情况。同样，对于单个事件，WS<sub>40m/s</sub>的影响最小，恢复速度最快，这使得系统能够有效地处理第二个事件。在WS<sub>50m/s</sub>和WS<sub>60m/s</sub>的情况下，由于在第二次事件发生之前基础设施的弹性受到了较大的影响和部分恢复，因此可以观察到基础设施弹性的进一步退化，即在第二次事件发生后，线路跳闸的百分比增加。

图14显示了不同场景的对比，即WS<sub>50m/s</sub>的基数，不同风暴强度(SC1，应用的第一场风暴为WS<sub>50m/s</sub>，第二次WS<sub>60m/s</sub>)，对WS<sub>50m/s</sub>的响应性和鲁棒性提高了20%(分别为SC2和SC3)。事件之间的时间间隔为120小时。在SC1中，第二次事件的强度越高，导致基础设施弹性退化程度越高，即使在第二次事件发生之前已经发生了一些弹性恢复。与基本方案相比，SC2中更有效和更快的响应能够在第一次事件后更快更快地恢复，从而导致第二次事件后的弹性下降更低。在两次风暴期间，SC3的恢复能力退化程度最低。



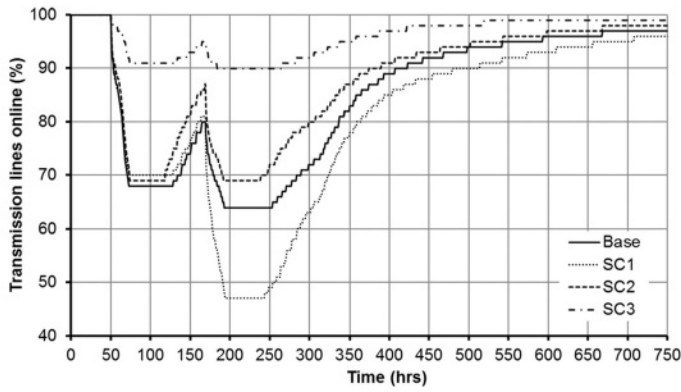


图14所示。不同场景下，测试系统连续遭遇两次风暴时的输电线路在线(%)。

#### D. 智能运行措施(“防御性孤岛”)和对区域尺度风暴的恢复力评估

在前面的章节中，已经评估了测试网络对大电网规模风暴的弹性，这被认为是受天气事件影响的地区的最坏情况。在本节中，对区域尺度的风暴进行了建模。特别是，风暴袭击了测试网的北部和中东部地区，更具体地说，是连接节点1-10和14-17的输电走廊(见图5)。根据历史数据[20], [23]，这个GB区域受到强风的袭击严重且相当频繁。此外，为了评估区域风暴可能引起的故障传播对网络其余部分的影响，本研究考虑并建模了级联机制，如[19]所示。

在[19]中，为了确定“智能”操作措施对增强电力系统对极端天气事件的恢复能力的影响，开发并全面介绍了基于严重风险指数的防御性孤岛(DI)方案。在这项工作中，该DI方案被用作案例研究，以证明弹性度量框架量化此类“智能”运营策略贡献的能力。

仅考虑由热过载引起的级联，并且由于热过载而被保护设备跳闸的线路(这些线路未被风暴损坏)在下一个小时重新连接。线路重新连接很重要，因为它在决定应用时增加了防御性孤岛的选择(下一个模拟步骤中可能形成的岛屿)，并减少了拥堵的可能性。考虑到由于热过载导致的保护跳闸后，为了重新连接线路，一小时的时间是足够的。未检查线路重连过程中的瞬态现象。此外，需要注意的是，重新连接是以受控的方式施加的，因此假定不太可能出现可能导致不稳定的瞬态现象。

防御性孤岛隔离了受极端天气袭击的区域，以防止级联事件扩散到网络的其他部分。重新连接岛屿后的应用

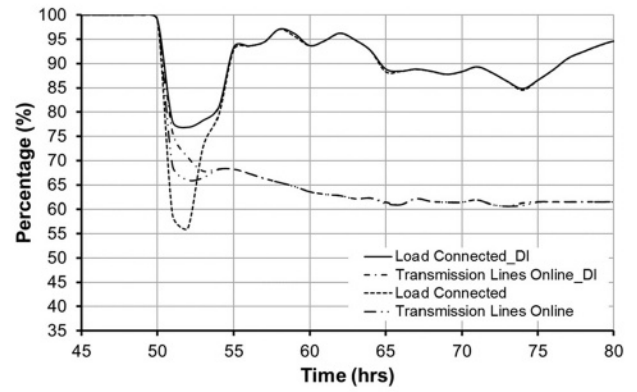


图15所示。针对电网规模的风暴，采用/不采用防御孤岛的情况下，事件期间的输电线路和在线负荷(仅限第一期)。

的问题在[19]中有讨论。为了模拟高应力条件，从而能够有效地展示DI对测试网络弹性的贡献，这里每小时的负荷需求增加了20%，并且使用高于40 m/s的最大风速来测试系统的弹性[19]。

DI不能防止风暴对线路的直接破坏。它的应用是为了防止由于极端天气造成线路损坏而引发的级联事件。由于由于热过载而被保护的跳闸线路在接下来的一个小时内重新连接，因此在第一阶段结束时，由于有或没有DI，由于风暴而损坏的线路数量将是相同的。因此，在第一阶段应用操作措施DI，并且能够增强系统的弹性仅在图2的第一阶段，因为过载的线路在接下来的一个小时内重新连接。因此，为了更清楚地展示DI的贡献，图15显示了只有在恢复梯形的第1阶段(风暴时间= 50 h, 风暴持续时间= 24 h)，有和没有DI的输电线路和在线负荷(%)。在极端天气事件的最初几个小时内，系统的恢复能力显著提高，因为可以观察到，有DI的恢复指标高于没有DI的。这是因为通常在风暴袭击系统的头几个小时内观察到较多的跳闸线路。因此，这可能会导致级联事件，这将DI视为减轻级联中断影响的有效解决方案。在接下来的几个小时里，由于有几条线路已经跳闸，失败的线路数量减少了。这使得DI的效果不那么关键了。

有趣的是，图15中的弹性曲线在第一阶段并不是单调下降的，就像前面章节中没有考虑级联机制一样。进一步，可以看到DI影响 $\Delta$ -metric，即在阶段*i*的每小时恢复力下降的低程度。还可以观察到，在风暴袭击网络的前几个小时之后，连接的负载增加，而在线传输线进一步减少。这是因为在GB的东南部地区有大型城市中心(例如伦敦25号节点)，它们的电气化可能会因事件早期的级联事件而中断，但很快就会重新连接。值得注意的是，所有先前的案例研究都可以结合起来应用

与DI一起研究它们对弹性梯形的综合影响。

## V. 结论

本文讨论了多相弹性梯形。使用基于 $\Phi\Lambda E\Pi$ (发音类似“FLEP”)弹性指标的新型弹性量化框架对该梯形进行了系统化,该弹性量化框架与梯形的面积一起定义了一组专门开发的五个弹性指标。通过使用不同的弹性指标来量化这些指标,所提出的框架严格区分了运营和基础设施弹性的概念,并能够对受极端天气影响的电力系统的运营和基础设施弹性性能进行系统建模,即弹性下降的速度有多快( $\Phi$ -metric)和速度有多低( $\Lambda$ -metric),事件后退化状态的持续时间有多广( $E$ -metric),以及它达到事件前状态的速度有多快( $\Pi$ -metric)。因此,所提出的方法能够有效地模拟受极端事件影响的基础设施的时间依赖性行为。

不同的结构和操作弹性增强策略的效果可以使用所提出的框架进行量化。因此,这可以支持适应政策,这是另一个关键的随时间变化的弹性特征。

案例研究应用的重点是评估29总线测试版本的GB输电网络对电网规模的单次和多次风暴的恢复能力。还评估了测试网络对区域尺度风暴的恢复能力,并应用了防御性孤岛的智能运营策略。结果清楚地证明了所提出的框架和指标的适用性、有效性和灵活性,这些框架和指标用于量化电力系统的弹性,评估不同运营和基础设施方面对电力系统暴露于极端事件时行为的影响,并评估不同弹性增强策略的效益。

正在进行的工作旨在说明拟议的指标框架如何在完整的成本/效益分析框架中使用,以支持实现弹性和成本目标的量化决策。

## 参考文献

- [1] C. S. Holling, “Resilience and stability of ecological systems,” *Annu. Rev. Ecol. Systematics*, vol. 4, pp. 1–23, 1973.
- [2] K. Tierney and M. Bruneau, *Conceptualizing and Measuring Resilience: A Key to Disaster Loss Reduction*. The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, *Transportation and Research, News*, vol. 250, May–Jun. 2007.
- [3] W. Neil Adger, “Social and ecological resilience: Are they related?,” *Progr. Human Geography*, vol. 24, pp. 347–364, 2000.
- [4] National Science and Technology Council, *Grand Challenges for Disaster Reduction*. Washington DC, USA, Subcommittee on Disaster Reduction, 2005.
- [5] A. Rose, “Economic resilience to natural and man-made disasters: Multi-disciplinary origins and contextual dimensions,” *Environ. Hazards*, vol. 7, no. 4, pp. 383–398, 2007.
- [6] M. Lembani *et al.*, “Health systems resilience: A systems analysis,” Re-Build Consortium, Final Report, Oct. 2014.
- [7] M. Panteli and P. Mancarella, “Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 259–270, 2015.
- [8] M. Panteli and P. Mancarella, “The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 58–66, May/Jun. 2015.
- [9] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick, “Research on resilience of power systems under natural disasters—A review,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, Mar. 2016.
- [10] M. Ouyang and L. Dueñas-Osorio, “Time-dependent resilience assessment and improvement of urban infrastructure systems,” *Chaos*, vol. 22, Sep. 2012, Art. no. 033122.
- [11] M. Ouyang and L. Dueñas-Osorio, “Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems,” *Struct. Safety*, vol. 48, pp. 15–24, May 2014.
- [12] D. Henry and J. E. Ramirez-Marquez, “Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time,” *Rel. Eng. Syst. Safety*, vol. 99, pp. 114–122, Mar. 2012.
- [13] D. A. Reed, K. C. Kapur, and R. D. Christie, “Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure,” *IEEE Syst. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 174–180, May 2009.
- [14] G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, and M. Bruneau, “Framework for analytical quantification of disaster resilience,” *Eng. Struct.*, vol. 32, pp. 3639–3649, Nov. 2010.
- [15] M. Ouyang, L. Dueñas-Osorio, and X. Min, “A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems,” *Struct. Safety*, vol. 36–37, pp. 23–31, May–Jul. 2012.
- [16] M. Panteli, C. Pickering, S. Wilkinson, R. Dawson, and P. Mancarella, “Power system resilience to extreme weather: Fragility modelling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures,” *IEEE Trans. Power Syst.*, to be published.
- [17] S. Espinoza, M. Panteli, P. Mancarella, and H. Rudnick, “Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 352–361, Jul. 2016.
- [18] M. Belivanis and K. Bell, “Representative GB network model,” 2011. [Online]. Available: <http://www.maths.ed.ac.uk/optenergy/NetworkData/reducedGB/>, Accessed: Sep. 2016.
- [19] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziaargyriou, “Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2913–2922, Nov. 2016.
- [20] National Grid PLC, *Electricity Ten Year Statement*, U.K., 2013.
- [21] M. Kirsty and K. R. W. Bell, “Wind related faults on the GB transmission network,” in *Proc. Probabilistic Methods Appl. Power Syst.*, Durham, U.K., 2014, pp. 1–6.
- [22] UK Met Office, “Beaufort wind force scale,” 2016. [Online]. Available: <http://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/marine/beaufort-scale>
- [23] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, “ERA Interim,” 2016. [Online]. Available: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>



**Mathaios Panteli** (S'09-M'13) 获得硕士学位。2009年在希腊塞萨洛尼基塞萨洛尼亚里士多德大学获得博士学位,2013年在英国曼彻斯特曼彻斯特大学获得电力工程博士学位,并在那里做了几年博士后研究助理。2015年9月,他加入塞浦路斯尼科西亚塞浦路斯大学,担任研究助理,并加入塞浦路斯尼科西亚大学,担任兼职讲师。他目前是the University Manch-电力和能源部门的讲师

酯。他的主要研究兴趣包括停电的分析和预防以及电力系统的风险和弹性评估。



**Pierluigi Mancarella**(2008 - 2014), 分别于2002年和2006年获得意大利都灵理工大学(Politecnico di Torino)电力系统专业的硕士和博士学位。他目前是澳大利亚墨尔本大学电力系统讲座教授, 英国曼彻斯特大学曼彻斯特智能能源系统教授。他的研究兴趣包括多能源系统, 低碳技术的电力系统集成, 不确定性下的网络规划, 以及智能电网的风险和弹性。他是

IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID 的编辑, IEEE SYSTEMS JOURNAL的副编辑, 以及IEEE PES杰出讲师。



**Elias Kyriakides** (S'00-M'04-SM'09), 2000年毕业于USA伊利诺伊州芝加哥伊利诺伊理工学院, 2001年和2003年分别获得USA亚利桑那州坦佩州立大学电气工程专业的硕士和博士学位。他目前是塞浦路斯尼科西亚塞浦路斯大学电气和计算机工程系的副教授, 也是KIOS智能系统和网络研究中心的创始成员。他曾担任ESF-COST行动IC0806的行动主席

“关键基础设施系统的智能监控和安全”(IntelliCIS)(2009-2013)。主要研究方向包括电力系统的同步测量、电力系统网络的安全性和可靠性、电力系统运行技术的优化、可再生能源的集成等。



**Dimitris N. Trakas** (S'16)于2009年获得希腊雅典雅典国立技术大学(NTUA)电气和计算机工程学士学位, 并于2011年获得NTUA能源生产与管理理学硕士学位。目前在NTUA电力动力学部攻读博士学位。他的研究兴趣包括电力系统的分散控制、弹性评估和电力系统的增强。



**Nikos D. Hatziargyriou** (S'80-M'82-SM'90-F'09)是Hellenic Distribution Network Operator的董事长兼CEO。自1984年以来, 他一直在雅典国立技术大学电气和计算机工程系的动力学部工作, 自1995年以来, 他一直是电力系统的正教授。从2007年2月到2012年9月, 他担任希腊公共电力公司(PPC)的副CEO, 负责输配电网络、岛屿DNO和测试、研究和原型中心。他

是《微电网:架构与控制》一书的作者, 并发表了200多篇期刊出版物和500多篇会议论文集。他是电力系统动态性能委员会的前任主席, CIGRE的杰出成员, CIGRE SC C6“配电系统和分布式发电”的前任主席。他是能源转型智能网络EU技术和创新平台的联合主席。他是雅典科学院能源委员会的成员。他参与了60多个由欧盟和工业界资助的研发项目, 并协调了EU的“CARE”、“more CARE”、“MERGE”、“微电网”和“more微电网”项目。