用于表征电力系统韧性的生态稳健性扩展模型

Hao Huang*†，*IEEE* 会员，Katherine R. Davis，*IEEE* 高级会员†，H. Vincent Poor，*IEEE* 会士*
*普林斯顿大学电气与计算机工程系，美国新泽西州普林斯顿市，邮编 08544
†德克萨斯农工大学电气与计算机工程系，美国德克萨斯州大学城，邮编 77843 电子邮箱:
hh6219@princeton.edu，katedavis@tamu.edu，poor@princeton.edu

arXiv:2303.04281v2 [eess.SY] 2 Oct 2023

摘要——**生态系统的长期韧性特征已通过食物网中的能量传递量化为生态稳健性（R_{ECO}）。韧性生态系统的 R_{ECO} 倾向于在食物网的网络效率与冗余之间保持平衡。通过将 R_{ECO} 与电力系统约束相结合，作者能够通过网络设计和系统运行优化电力系统作为生态系统所固有的韧性。先前的模型基于有功潮流，并聚合冗余组件，以严格映射生态系统与电力系统。然而，无功潮流也决定着电力系统的韧性；电力元件的冗余也是全局网络冗余的一部分。在面向 R_{ECO}的电力系统评估与优化中，应考虑这些特性。因此，本文扩展了用于量化电力系统中 R_{ECO} 的模型，在考虑发电机冗余布置的基础上，采用有功、无功和视在功率流。通过回顾面向 R_{ECO}的最优潮流在*N-x* 故障情况下的性能，分析表明，为了通过 R_{ECO} 表征电力系统固有的韧性，应纳入无功潮流和冗余组件。**

索引词—**韧性、电力系统韧性、生态系统、生物系统建模**

一、引言

电力系统是现代社会的支柱，负责利用不同能源发电，并将电能输送和交付给终端用户。然而，日益频繁的突发事件，包括网络攻击和自然灾害，已中断电力系统的功能并损害其可靠性，从而威胁整个社会福利的安全。增强电力系统抵御任何来源扰动的内在韧性，以维持安全性和可靠性，是一项紧迫任务。

电力系统韧性被定义为避免或承受电网应力事件而不发生运行受损的能力，或适应并补偿由此产生的压力，从而通过优雅降级将受损程度降至最低的能力 [1]。人们已提出各种方法和指标来量化韧性 [2]–[4]。在 [2],Panteli 等人基于多阶段韧性梯形，提出了一组指标，用于量化电力系统抵御自然灾害的韧性。在 [3],Clark 和 Zonouz 提出了一种基于马尔可夫决策过程的信息物理韧性指标，用于评估网络攻击对运行造成的影响。同样，Tushar 等人利用对物理网络和网络空间网络的图形分析，量化信息物理输电韧性即在极端事件下供应能量的能力 [4]。上述方法的共同点在于，它们侧重于电力系统在面对特定类型灾害时的功能和安全性，却忽视了系统吸收非特定扰动的内在能力。

这一韧性概念可追溯至20世纪70年代，当时*C.S. Holling* 将生态学中的韧性定义为衡量系统吸收变量和参数变化能力的指标 [5]。生态系统经过数百万年的演化，得以在扰动中生存。在生态系统中，食物网以图形方式呈现不同物种之间基于捕食关系形成的食物链。该图描绘了生态系统中能量和物质的流动，其中包含生态系统具有韧性的结构特性 [6]。生态学家开发了多种方法和指标来表征韧性特征，例如生态稳健性（R_{ECO}）、循环指数和系统有序度（系统有序度） [7], [8]。为模仿生态系统的韧性特征，这些指标已用于指导各种人造网络的韧性设计，包括供水网络 [9], 供应链 [10],和工业副产品网络 [11]。

在上述指标中，R_{ECO} 与生态系统的长期韧性 [8]直接相关。它源自一种信息论方法，该方法考虑食物网中所有物种之间的能量转换，并将其表示为路径效率 和冗余的函数。稳健食物网的 R_{ECO} 值处于一个特定范围内，称为活力窗口，该范围界定了生态系统中可持续且具有韧性的行为。通过建立电力系统与生态系统之间的一一映射，将母线和发电机建模为物种（行为者），将有功功率流等同于能量传递，并将潮流方向视为捕食者—猎物 关系，我们便能够量化电力系统的 R_{ECO}。这使得 R_{ECO} 能够与电力系统约束相结合，从而优化电力网络结构和系统运行，增强其固有韧性。当系统遭受多重灾害[12], [13]时，提高 R_{ECO} 可减少运行约束违例和未求解故障。

然而，先前关于 R_{ECO} 的研究并未考虑无功潮流，因为生态系统中没有与之对应的要素。无功潮流与电力系统的电压稳定性有关。与无功潮流相伴的是并联电容器，它们既可以发出无功功率，也可以

吸收无功功率，以调节电压并支撑系统。电力系统与生态系统的另一个区别在于冗余组件/行为者。在电力系统中，一条母线可以连接多个受独立控制的发电机；而在生态系统中，如果行为者属于同一物种，其能量传递会被汇总。基于组件与行为者的映射无法体现电力系统中的冗余。因此，本文提出的研究问题是电力系统的独特特征将如何影响 R 的量化$_{ECO}$?

为探究这一问题，本文扩展了电力系统与生态系统映射模型，并分别考虑处理电力系统中冗余组件的两种方式，针对不同类型的潮流（即有功、无功和视在功率流）计算 R_{ECO} 。该扩展模型应用于两个电力系统案例：IEEE 24 母线可靠性测试系统 [14]和简化的大不列颠（GB）电网 [15]，并采用 [12]中的不同最优潮流算法。通过 *N-x* 故障分析发现，基于无功功率的 R_{ECO} 更能捕捉电力系统固有的韧性；而组件冗余有助于提升 R_{ECO}。本文的主要贡献如下：

- 本文提出了电力系统与生态系统之间的详细映射，以研究考虑无功功率、视在功率和组件冗余时，生态指标在电力系统研究中的应用。该扩展的 R_{ECO} 评估已在 EasySimAuto (ESA) [16]中实现。
- 我们在不同最优潮流算法下，对两个电力系统算例进行了全面分析R_{ECO} 。结合*N-x* 故障下的性能，结果表明，计算R_{ECO} 时应纳入无功潮流和冗余组件，以便更好地捕捉电力系统的固有韧性。

II. 生态稳健性背景

R_{ECO} 量化了具有特定系统边界的食物网的鲁棒性。计算R_{ECO} 所需的输入是生态流矩阵（[**T**]），该矩阵反映了食物网系统边界内外的能量相互作用。图1展示了一个假想生态系统及其转换为 [**T**]的过程。基于捕食者—猎物关系交换能量的行为者（物种）位于系统边界内，而能量提供者、能量消费者和能量耗散则位于系统边界之外 [17]。因此， [**T**]是一个包含能量传递流量大小的方形（N+3） × （N+3）矩阵。N 表示系统边界内行为者的数量，额外的三行/列分别表示系统输入、有用的系统输出以及耗散或系统输出。必须强调的是，流入和流出行为者及系统的能量必须相等，才能维持能量守恒定律。

R_{ECO} 的计算源自**惊异度**和**不确定性** [8], 的概念，二者表示为：

$$s = -k \times log(p) \tag{1}$$

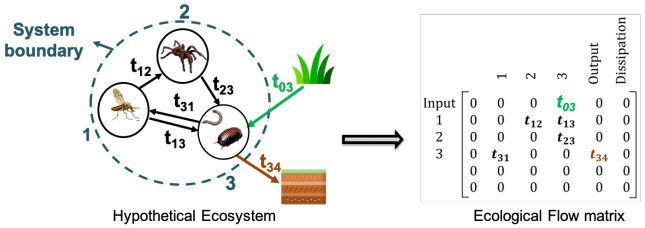


图 1. 将假想生态系统转换为生态流矩阵。改编自 [18]。

其中， s 表示观察到发生概率为 p的事件时所产生的“惊异度”， k 是一个正标量常数。本文中， k 的值始终为 1。

$$h_i = -k \times p_i \times log(p_i) \tag{2}$$

其中， h_i 是事件 i的不确定性。它是事件 p_i 出现与其缺失 s_i的乘积，用于衡量与事件 i相关的变化潜力。

因此，R_{ECO} 能够通过以下指标量化系统中考虑预期事件（扰动）时生态系统的鲁棒性：**系统总通量**（*TSTp*）、**上升度**（*ASC*）和**发展容量**（*DC*）。

系统总通量（*TSTp*） [8] 是 [**T**],中所有流的总和，用于表征系统规模：

$$TSTp = \sum_{i=1}^{N+3} \sum_{j=1}^{N+3} T_{ij} \tag{3}$$

上升度（*ASC*）衡量按系统规模和流组织进行缩放后的相互制约，描述生态系统的增长与发展过程 [19]。它给出了网络不确定性的有量纲形式，如下所示：

$$ASC = -TSTp \sum_{i=1}^{N+3} \sum_{j=1}^{N+3} \left(\frac{T_{ij}}{TSTp} log_2 \left(\frac{T_{ij} TSTp}{T_i T_j} \right) \right) \tag{4}$$

其中， T_i是$\sum_{j=1}^{N+3} T_{ij}$。 $\frac{T_{ij}}{TSTp}$可视为相对于系统中各流的事件概率。对于网络中的给定流（ij）， $\frac{T_{ij} TSTp}{T_i T_j}$是在已知源节点（$i$）和终节点（$j$）的情况下的条件概率。

发展容量(直流)由 Ulanowlcz 于 [20] 提出，作为 *ASC* 的上限，因为生态系统的增长和发展是有限的。它是食物网的总体不确定性，反映了所有事件（惊异度）所产生的综合影响（不确定性）。

$$DC = -TSTp \sum_{i=1}^{N+3} \sum_{j=1}^{N+3} \left(\frac{T_{ij}}{TSTp} log_2 \left(\frac{T_{ij}}{TSTp} \right) \right) \tag{5}$$

那么，R_{ECO} 的公式如下：

$$R_{ECO} = -\left(\frac{ASC}{DC} \right) ln \left(\frac{ASC}{DC} \right) \tag{6}$$

其中*ASC* 与直流 的比值反映了给定网络的路径效率，而其自然对数则表示网络的路径冗余 [8]。

稳健且有韧性的食物网的关键特征在于其网络路径效率 与路径冗余之间独特的平衡，使 R_{ECO} 的值落入活力窗口范围（约为 0.3679） [8]。

III. 电力系统生态流矩阵

以往的研究 [12], [13], [18] 将有功潮流建模为能量传递，并将电网组件（母线和发电机）视为类似于食物网物种的对象，从而建立 [**T**]，并通过方程（3）—（6）计算 R_{ECO} 。然而，潮流同时包含有功潮流和无功潮流。方程（7）—（10）展示了电力系统中的潮流方程和功率平衡方程，用于求解潮流分布问题。无功潮流用于支撑和稳定电力系统的电压。此外，视在功率 $S = P + iQ$ 以复数形式结合有功功率和无功功率，用于电力系统运行限值评估。

$$P_{ij} = V_i^2[-G_{ij}] + V_iV_j[G_{ij}cos(\theta_{ij}) + B_{ij}sin(\theta_{ij})] \quad (7)$$

$$Q_{ij} = V_i^2[B_{ij}] + V_iV_j[G_{ij}sin(\theta_{ij}) - B_{ij}cos(\theta_{ij})] \quad (8)$$

$$P_i = P_{load_i} - P_{gen_i} = \sum_j P_{ij} \quad (9)$$

$$Q_i = Q_{load_i} - Q_{gen_i} = \sum_j Q_{ij} \quad (10)$$

本文扩展了电力系统中 [**T**] 的模型，并将无功潮流和视在功率流 （幅值）纳入考量。与有功功率不同，无功功率还与另一种电力组件——并联电容器相关。并联电容器通过就地发出或吸收无功功率，有助于调节电压、改善电能质量并提高系统可靠性。对于无功功率，发电机也可以通过调整其设定值，选择发出或吸收无功功率，以维持系统稳定。

基于上述考虑，图2展示了电力系统中适用于任意类型潮流（T_{ij}）的扩展模型，分别可以是有功功率、无功功率或视在功率。以往的研究未对并联电容器建模，因为它既不产生也不消耗有功功率；本模型则将其纳入其中。根据 [**T**]，并联电容器被视为无功功率和视在功率的发电机。T_{gen_i} 是来自发电机 i的流。 T_{shunt_i} 是来自并联电容器 i 的流。由于发电机和并联电容器既可以产生也可以消耗无功功率，因此，根据流动方向， [**T**]中的相应条目既可以位于输入行，也可以位于输出列。T_{load_i} 和 T_{loss_i} 分别是母线i上的功率消耗和损耗。 T_{ij} 是节点 i 至 j对应支路上的潮流。如果母线、并联电容器和发电机之间没有潮流交互，则该条目为零。

除流类型外，本文还研究局部组件冗余。在食物网中，物种之间的能量传递会将同一物种的所有动物汇总，以量化整体路径效率和冗余。然而，在电力系统中，同类型组件，例如

		Gen 1	. . .	Gen n	Shunt 1	. . .	Shunt k	Bus 1	. . .	Bus m	Output	Dissipation
Input	0	T_{gen1}	. . .	T_{genn}	$T_{shunt\ 1}$	. . .	$T_{shunt\ k}$	0	. . .	0	0	0
Gen 1	0	0	. . .	0	0	. . .	0	T_{gen1}	. . .	0	0	0
.	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	.
Gen n	0	0	. . .	0	.	. . .	.	0	. . .	T_{genn}	0	.
Shunt 1	0	0	. . .	0	0	. . .	0	$T_{shunt\ 1}$	. . .	0	0	.
.	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	.
Shunt k	0	0	. . .	0	.	. . .	.	0	. . .	$T_{shunt\ n}$	0	0
Bus 1	0	0	. . .	0	0	. . .	0	0	. . .	T_{1m}	$T_{load\ 1}$	$T_{loss\ 1}$
.	.	.	. . .	.	.	. . .	.	T_{i1}	. . .	.	.	.
.	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	T_{ij}	T_{im}	.	.
.	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	. . .	.	.	.
Bus m	0	0	. . .	0	0	. . .	0	T_{m1}	. . .	0	$T_{load\ m}$	$T_{loss\ m}$
	0	0	. . .	0	0	. . .	0	0	. . .	0	0	0
	0	0	. . .	0	0	. . .	0	0	. . .	0	0	0

图2. 含有生态流矩阵 [**T**] 的扩展模型，适用于电网中任意类型的潮流，其中有n台发电机、k 个并联电容器和m 个母线。

发电机和并联电容器，连接到同一母线时，各自可能具有不同的配置和设定值。以往的方法会汇总同一母线上同类型组件的潮流，这可能会忽略局部网络／组件冗余。因此，借助扩展模型 [**T**]，，我们构建了两种 [**T**] ：一种汇总同一母线上同类型组件的潮流，另一种则拆分潮流，分别处理每个组件。采用不同的 [**T**],时，R_{ECO} 的值会有所不同，从而捕捉系统固有的韧性。

对于以下案例，R_{ECO} 的计算考虑了不同类型的潮流，并分别采用拆分和聚合潮流两种方法处理冗余局部组件。上述所有建模场景 [**T**]及生态指标计算均已在 EasySimAuto (ESA) [16]中实现。

IV. 案例研究与分析

本文针对两个电力系统案例——IEEE 24母线可靠性测试系统和简化的英国电网——分析了在 [12]中采用最优潮流（OPF）、*N-1* 安全约束最优潮流（SCOPF）、*N-x* SCOPF 以及 R_{ECO} OPF 时，考虑上述场景的 R_{ECO} 。所有案例均可在 [21]获取。为考察所有案例的潮流分布，表 I 给出了各类潮流分布的均值和标准差（*STD*）。

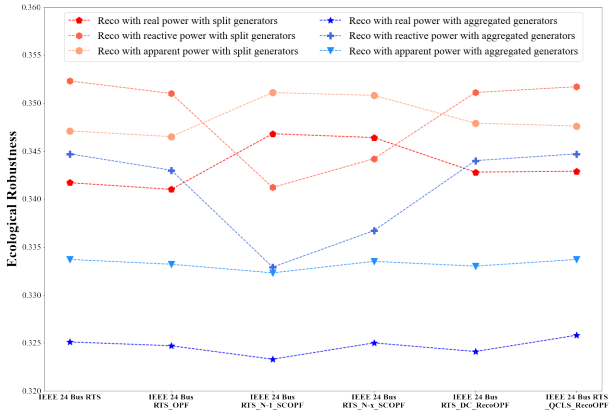
表 I 潮流分布的统计分析

使用案例	均值(pf)	标准差(pf)	均值(rf)	标准差(rf)	均值(兆伏安)	标准差(兆伏安)
IEEE 24节点可靠性测试系统	117.19	86.74	27.95	23.52	124.07	84.84
IEEE 24节点可靠性测试系统 最优潮流	115.60	83.11	27.30	23.53	122.26	81.38
IEEE 24节点可靠性测试系统 *N-1* 安全约束最优潮流	93.73	63.30	30.37	30.87	106.89	56.95
IEEE 24节点可靠性测试系统*N-x* 安全约束最优潮流	86.34	63.06	30.15	31.18	100.42	56.81
IEEE 24节点可靠性测试系统 直流 R_{ECO} 最优潮流	100.24	68.72	26.83	23.62	106.80	68.13
IEEE 24节点可靠性测试系统 QCLS R_{ECO} 最优潮流	104.21	68.38	26.92	23.21	110.36	67.97
简化的英国电网	575.53	471.74	89.21	104.74	593.79	469.16
简化的英国电网 OPF	555.97	444.76	90.19	104.55	574.24	442.98
简化的英国电网 *N-1* 安全约束最优潮流	522.69	442.07	85.65	104.70	540.13	441.80
简化的英国电网 *N-x* 安全约束最优潮流	436.39	392.80	83.66	103.39	453.72	395.68
简化的英国电网 直流 R_{ECO} 最优潮流	377.60	355.16	82.69	103.18	394.74	361.08
简化的英国电网 QCLS R_{ECO} 最优潮流	427.73	400.50	92.45	109.03	450.14	401.44

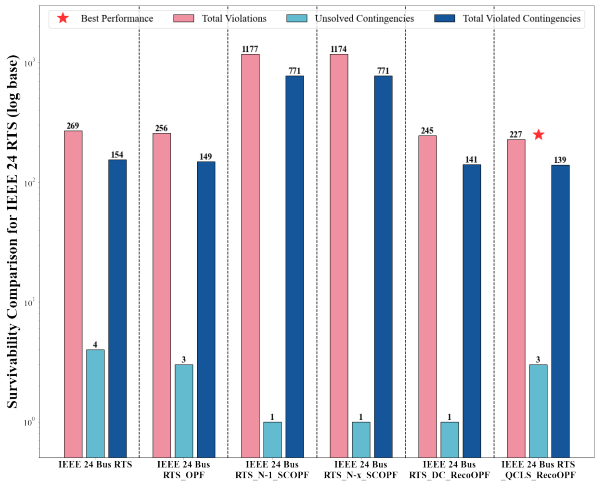
*A. IEEE 24*母线可靠性测试系统

对于 IEEE 24节点可靠性测试系统，系统中有一个并联电容器，且多个母线连接了多个发电机（2 至 4 台）。图 3(a) 分别展示了考虑聚合发电机和拆分发电机时，计及有功、无功和视在功率的 R_{ECO}值。为更好地将 R_{ECO} 与韧性联系起来，图 3(b) 展示了各最优潮流算法在*N-x* 故障（从系统中移除*x* 个元件）下的可生存性，并以越限数量、未求解故障数量和发生越限的故障数量进行量化。

首先，图 3(a) 显示，考虑发电机的冗余后，对应的 R_{ECO} 值高于忽略发电机冗余时的值。对于同一种潮流类型，所有红线都高于蓝线。电力系统组件的局部冗余有助于提升 R_{ECO}。这表明，可以利用 R_{ECO} 指导发电机组（如分布式能源资源）的选址，从而提升整体韧性。其次，在网络结构相同的情况下（将冗余发电机的流分开或汇总），基于无功功率流的 R_{ECO} 值最高（*N-1* SCOPF 和 *N-x* SCOPF 除外）；基于有功功率流的 R_{ECO} 值最低；基于视在功率流的 R_{ECO} 值则介于两者之间。这表明，即使网络结构相同，无功功率的分布也比其他流更具鲁棒性。尽管视在功率同时考虑有功功率和无功功率，但有功功率的幅值大于无功功率，并且假定视在功率流的方向与有功功率流一致。因此，基于视在功率的 R_{ECO} 变化趋势接近基于有功功率的 R_{ECO}。



(a) R_{ECO} 不同潮流和模型的比较



(b) 不同最优潮流的可生存性比较。
转载自 [12]

图 3. 不同最优潮流算法下 IEEE 24母线可靠性测试系统的 R_{ECO} 分析

R_{ECO} 在*N-1* 和*N-x* 安全约束最优潮流案例中的差异，可以很好地用*N-x* 故障下的可生存性以及潮流分布的统计分析来解释。图 3(b) 显示，采用二次凸松弛交流（QCLS）模型的 R_{ECO} 最优潮流表现最佳，越限和未求解故障最少；而*N-1* 和*N-x* 安全约束最优潮流表现最差。只有基于无功功率潮流的 R_{ECO} 反映了这一规律，而 R_{ECO}的趋势与可生存性比较的趋势相当接近。由于大多数越限都与电压有关，而电压又与无功功率潮流分布相关，因此，基于无功功率潮流的 R_{ECO} 能够更好地捕捉系统吸收扰动的内在能力，这是合理的。以往研究未能发现这一点。通过对各种类型潮流进行统计评估可以发现，在 R_{ECO} 最优潮流案例中，无功功率的分布比安全约束最优潮流案例更加均匀。这也证明，潮流的均匀性有助于系统应对连锁故障 [12]。

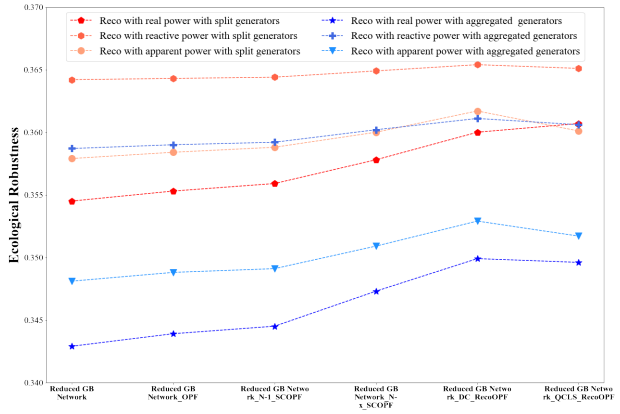
B. 缩减的大不列颠网络

对于简化的英国电网，系统中没有并联电容器，但有若干母线连接了多个发电机（2 至 5 台）。类似地，图 4(a) 分别展示了采用聚合发电机和拆分发电机时，考虑有功、无功和视在功率流的 R_{ECO} 值，其中聚合发电机对应 aggregated generators and split generators, respectively；图 4(b) 展示了各个案例在*N-x* 事故下的可生存性。

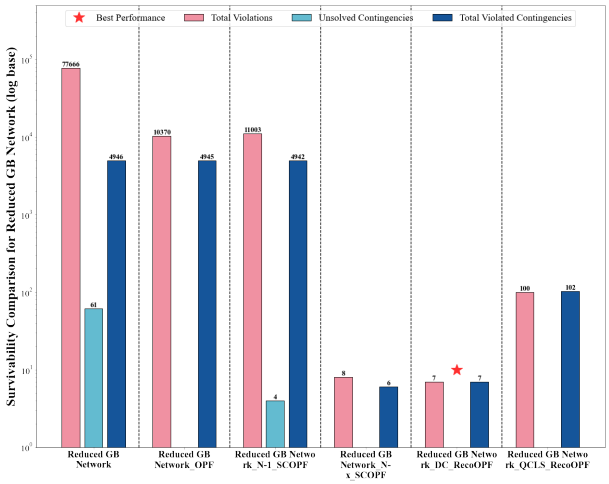
结果与 IEEE 24母线可靠性测试系统类似。首先，考虑发电机冗余时，R_{ECO} 的值更高。其次，在具有相同结构的 [**T**], 下，基于无功功率的 R_{ECO} 最高，其次是基于视在功率和有功功率的 R。第三，对于此案例，除基于有功功率的 R_{ECO}外，基于其他潮流的 R_{ECO} 趋势与可生存性以及潮流分布的统计分析具有较强的相关性。R_{ECO} 最高的情况在*N-x* contingencies下表现最佳，其潮流分布也最均匀。弹性较差的情况具有较低的 R_{ECO} ，且潮流分布也较不均匀。

V. 结论与未来工作

本文提出了一种扩展模型，将电力系统与生态系统映射起来，以应用 R_{ECO} 评估电力系统的鲁棒性和韧性。通过案例研究，我们得出以下结论。首先，基于无功功率的 R_{ECO} 能够更好地捕捉系统的韧性



(a) 不同流和模型的对比



(b) 不同最优潮流之间的可生存性对比。
复制自 [12]

图 4. 不同最优潮流算法下简化的大不列颠（GB）电网的分析

和可生存性，因为在*N-x* 故障分析中，电压越限占主导。将基于有功功率和无功功率的 R_{ECO} 用作韧性指标，以评估和优化系统吸收扰动的内在能力，具有巨大潜力。其次，研究发现，组件冗余有助于提升 R_{ECO}。这为利用 R_{ECO} 对发电机组进行战略性选址开辟了新方向，例如部署分布式能源资源和可再生能源。可再生能源的随机性体现在其输出（有功功率和无功功率）中，可在面向 R_{ECO}的随机优化中予以考虑。这样便能有针对性地增加局部冗余，从而提升系统整体的鲁棒性和韧性。

致谢

作者谨此感谢美国国家科学基金会提供的第 1916142 号和第 2039716 号资助、美国能源部能源输送系统网络安全计划提供的编号为 DE-OE0000895 的资助，以及 C3.ai数字化转型研究院提供的资助，以支持本研究。

参考文献

[1] J. Taft，《电网架构的电网韧性与可靠性》，太平洋西北国家实验室（PNNL），美国华盛顿州里奇兰，2017 年。[2] M. Panteli、P. Mancarella、D. N. Trakas、E. Kyriakides 和 N. D. Hatziargyriou，《电力系统运行与基础设施韧性的度量与量化》，IEEE《电力系统汇刊》，第 32 卷，第 6 期，第 4732–4742 页，2017 年。[3] A. Clark 和 S. Zonouz，《信息物理韧性：定义与评估指标》，IEEE《智能电网汇刊》，第 10 卷，第 2 期，第 1671–1684 页，2017 年。[4] V. Venkataramanan、A. Srivastava、A. Hahn 等，《Cp-tram：信息物理输电韧性评估指标》，IEEE《智能电网汇刊》，第 11 卷，第 6 期，第 5114–5123 页，2020 年。[5] C. S. Holling，《生态系统的韧性与稳定性》，《生态学与系统学年度评论》，第 4 卷，第 1 期，第 1–23 页，1973 年。[6] J. Cohen、R. Beaver、S. Cousins、D. DeAngelis、L. Goldwasser、K. Heong、R. Holt、A. Kohn、J. Lawton、N. Martinez 等，《改善食物网》，《生态学》，第 74 卷，第 1 期，第 252–258 页，1993 年。[7] B. D. Fath、U. M. Scharler、R. E. Ulanowicz 和 B. Hannon，《生态网络分析：网络构建》，《生态建模》，第 208 卷，第 1 期，第 49–55 页，2007 年。[8] R. E. Ulanowicz、S. J. Goerner、B. Lietaer 和 R. Gomez，《量化可持续性：韧性、效率与信息论的回归》，《生态复杂性》，第 6 卷，第 1 期，第 27–36 页，2009 年。[9] T. Dave 和 A. Layton，《将生态启发的鲁棒性融入供水网络设计》，《清洁生产期刊》，第 254 卷，第 120057 页，2020 年。[10] A. Chatterjee 和 A. Layton，《仿效自然，设计具有韧性的资源与基础设施网络》，《可靠性工程与系统安全》，第 204 卷，第 107142 页，2020 年。[11] A. Layton、B. Bras 和 M. Weissburg，《生态稳健性作为可持续工业系统的设计原则》，载于《国际设计工程技术会议暨计算机与信息工程会议论文集》，第 57113 卷。美国机械工程师学会，2015 年，第 V004T05A047 页。[12] H. Huang、Z. Mao、A. Layton 和 K. R. Davis，《面向电力系统可生存性的生态稳健性导向最优潮流》，IEEE《电力系统汇刊》，第 1–1 页，2022 年。[13] H. Huang、Z. Mao、V. Panyam、A. Layton 和 K. R. Davis，《面向多重灾害韧性的生态鲁棒性导向电网网络设计》，IEEE《电力系统汇刊》，第 1–1 页，2022 年，审稿中。[14] R. D. Zimmerman、C. E. Murillo-S´anchez 和 R. J. Thomas，《Matpower：电力系统研究与教育的稳态运行、规划和分析工具》，IEEE《电力系统汇刊》，第 26 卷，第 1 期，第 12–19 页，2010 年。[15] W. Bukhsh 和 K. McKinnon，《真实输电网络的网络数据》，2013 年在线发布于 http://www. maths. ed. ac. uk/optenergy/NetworkData。[16] B. L. Thayer、Z. Mao、Y. Liu、K. Davis 和 T. Overbye，《Easy SimAuto（ESA）：简化与 PowerWorld仿真器交互的 Python软件包》，《开放源码软件期刊》，第 5 卷，2289，2020 50，第。页。[17] R. E. Ulanowicz，《增长与发展：生态现象学》。施普林格科学与商业媒体，2012 年。[18] V. Panyam、H. Huang、B. Pinte、K. Davis 和 A. Layton，《电力网络的仿生设计》，载于《2019 IEEE德克萨斯电力与能源会议（TPEC）》。IEEE，2019 年，第 1–6 页。[19] R. E. Ulanowicz，《关于自然群落发展的假说》，《理论生物学杂志》，第 85 卷，245，1980 2，223第。页。–。[20] R. E. Ulanowicz 和 J. S. Norden，《流网络中的对称性开销》，《国际系统科学杂志》，第 21 卷，第 2 期，第 429–437 页，1990 年。[21] K. Davis，《复杂能量系统的仿生设计》，2021 年，德克萨斯农工大学工程学院。 [在线]。访问地址：https://katedavis.engr.tamu.edu/projects/bio-inspired-design-of-complex-energy-systems/