

4-14-2021

## Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage

Weiqing Sun

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Zhang Jie

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Ye Lei

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Han Dong

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage

## Abstract

**Abstract:** Based on the definition and principle of power system resilience, combining the traditional energy storage equipment with the demand response, *an optimization method of power system operation resilience considering generalized energy storage is proposed*. Five attack schemes based on topology are evaluated according to four indexes, and the most disadvantageous attack strategy is selected to simulate the damage of power system. Taking the minimum operating cost of the system as the objective, a combined scheduling model involving wind power station and energy storage unit is carried out. *A generalized energy storage scheduling method* is proposed to improve the resilience of power grid in operation period in recovery stage, and an optimal model of disaster recovery is established to maximize the system resilience. The optimal recovery strategy is calculated by genetic algorithm. The IEEE 30-bus system is taken as an example to verify the effectiveness of the generalized energy storage in improving the system performance and the resilience of power grid operation.

## Keywords

resilient grid, generalized energy storage, power grid attack, recovery strategy

## Recommended Citation

Sun Weiqing, Zhang Jie, Ye Lei, Han Dong. Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 962-972.

## 考虑广义储能的电力系统运行弹性优化

孙伟卿, 张婕, 叶磊, 韩冬

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 基于电力系统弹性定义及原理, 将传统电储能设备与需求响应相结合, 提出一种考虑广义储能的电网运行弹性优化方法。根据 4 种指标来综合评价 5 种基于拓扑的攻击方案, 选取对系统性能最不利的攻击策略以模拟对电力系统的破坏。以系统运行成本最小为目标进行含风力电站、储能机组组合调度。针对灾时容灾阶段提出可改善运行期电网弹性的广义储能调度方法, 并建立以系统弹性最大为目标的灾后恢复优化模型, 通过遗传算法计算最优恢复策略。以 IEEE-30 节点系统为算例验证了广义储能改善系统灾后性能并提高电网运行弹性的有效性。

**关键词:** 弹性电网; 广义储能; 电网攻击; 恢复策略

中图分类号: TM 721; TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 04-0962-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0632

## Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage

Sun Weiqing, Zhang Jie, Ye Lei, Han Dong

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on the definition and principle of power system resilience, combining the traditional energy storage equipment with the demand response, an optimization method of power system operation resilience considering generalized energy storage is proposed. Five attack schemes based on topology are evaluated according to four indexes, and the most disadvantageous attack strategy is selected to simulate the damage of power system. Taking the minimum operating cost of the system as the objective, a combined scheduling model involving wind power station and energy storage unit is carried out. A generalized energy storage scheduling method is proposed to improve the resilience of power grid in operation period in recovery stage, and an optimal model of disaster recovery is established to maximize the system resilience. The optimal recovery strategy is calculated by genetic algorithm. The IEEE 30-bus system is taken as an example to verify the effectiveness of the generalized energy storage in improving the system performance and the resilience of power grid operation.

**Keywords:** resilient grid; generalized energy storage; power grid attack; recovery strategy

## 引言

电力系统是国家重要基础设施之一, 政治经济发展与社会稳定仰赖于可靠的电力系统。迄今为止全球多次发生大停电事故<sup>[1-4]</sup>。综合考虑大面积停电所涉及的负荷比例、影响用户规模、停电持续时

间、舆论关注度等因素, 全球在 1965—2012 年间发生了 140 起影响较大的停电事故<sup>[5]</sup>。一般威胁电网正常运行的形式主要分为 2 种: (1) 灾难性气候对电力系统元件的破坏, 这种破坏随机性大, 难以预测; (2) 针对电网的攻击, 包含人为破坏和网络攻击, 分别针对电网一次和二次系统, 统称为针对

收稿日期: 2019-12-04 修回日期: 2020-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(51777126)

第一作者: 孙伟卿(1985-), 男, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为智能电网、电力系统储能、电力系统评估与优化。E-mail: sidswq@163.com

电网的不对称攻击, 由于这是一种蓄意攻击, 对电网的薄弱环节具有针对性强, 隐匿性高的特点<sup>[6-8]</sup>。这 2 种形式统称为“电网灾难”。

针对一次系统的不对称攻击可导致电力系统设备损坏, 甚至导致电网瘫痪。2013 年 4 月, 美国加州梅特卡夫变电站遭遇枪击, 17 台 500 kV 大型变压器油泄漏, 过热保护动作导致当地负荷非计划切除<sup>[9]</sup>。2015 年 12 月, 乌克兰电力部门遭受针对电力二次系统的恶意攻击, 7 所 110 kV 变电站、23 所 35 kV 变电站断开, 8 万用户非计划断电<sup>[10]</sup>。

目前针对灾后抢修的研究主要集中在考虑含分布式能源的恢复策略。文献[11]建立灾后多小队分阶段抢修策略的优化模型。文献[12]提出基于重构及并网的微网差异化恢复运行方法。此外, 为了更好地改善电网灾后运行弹性, 应从优化修复序列着手, 文献[13]考虑到现有算法很难找到抢修策略中的全局最优解, 提出将普通粒子群算法加入二进制实现电力网络故障的快速恢复。文献[14]通过修改风险决策效用理论解决了电网多故障抢修问题。

但是上述研究仅仅是考虑灾后的电网恢复策略, 而未考虑在灾时最大程度削减灾害对电网的影响。而储能固有的时空调节属性可在局部电网被破坏后的一段时间内为部分负荷持续供电从而起到缓冲灾害损失, 改善灾后系统性能的作用。2016 年 6 月 20 日我国发改委、工信部和能源局联合印发《中国制造 2025—能源装备实施方案》, 储能装备成为能源装备发展任务 15 个领域之一。在相关政策支持下, 灾后储能中等规模应急供电场景有了实现的可能。

作为电力系统运行的重要环节之一, 电力用户在电网遭受攻击、性能下降时, 不应仅仅被动承受损失。在未来开放电力市场中, 电力零售商/售电商完全可以通过调整实时电价对灾时一灾后电力负荷实现需求侧调控, 通过削减柔性负荷, 与狭义电储能等设备一起形成一种广义储能设施, 为重要

用户供电、电网抢修赢取时间, 以市场化手段降低电网容灾和恢复成本。

本文将电网运行期分为灾前预防、灾时容灾、灾后恢复 3 个阶段。灾前预防阶段以系统运行成本最小为目标进行含狭义储能的机组组合调度。灾时容灾阶段, 提出通过对广义储能的适当调度来改善容灾期弹性的具体方案。灾后恢复阶段, 以系统弹性最大为目标建立灾后恢复次序优化模型, 采用遗传算法求解, 得到最佳恢复策略。通过 IEEE-30 节点系统进行仿真, 验证了方法的有效性。结果表明, 该方法能够有效提高灾后系统运行弹性。

## 1 弹性概念及其评估指标

弹性概念由生态学家 C. S. Holling 于 1973 年提出, 他认为弹性是指生态系统遭部分破坏后, 依旧维持其状态的能力<sup>[15]</sup>。Bruneau 认为弹性是社会组织或机构抵御灾害发生, 控制灾害蔓延, 恢复社会秩序的能力<sup>[16]</sup>。2009 年美国国土安全部指出, 弹性是系统对于潜在破坏性事件具有预防、承受抵御和恢复的能力<sup>[17]</sup>。针对电网而言, 高弹性电网应具有以下 3 个特点:

(1) 灾前预防阶段, 即在电网遭受灾前能有针对性地做出相应的准备, 位于图 1 中  $t_0 \sim t_1$  区间内。该阶段可以在电网规划时, 识别出关键节点, 并对薄弱的节点或线路提前进行强化或改造, 做好对灾难的提前预防工作。

(2) 灾时容灾阶段, 即在电网遭受攻击时能对所遭受的攻击进行响应及抵御, 位于图 1 中  $t_1 \sim t_2$  区间内。该阶段是本文的主要研究对象之一, 在该阶段通过广义储能尽可能地改善系统性能。

(3) 灾后恢复阶段, 具备在电网遭受攻击后能快速恢复到灾前的运行状态的能力, 位于图 1 中  $t_2 \sim t_3$  区间内。该阶段是本文的最重要研究对象, 通过优化节点修复次序使得灾后系统弹性最大化, 即恢复速度尽可能最快。

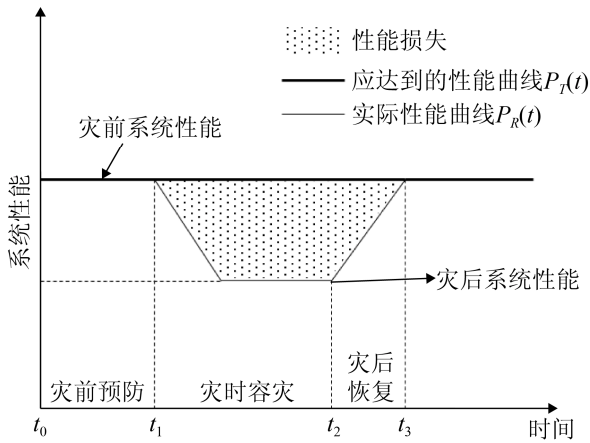


图1 电网灾难前后理想性能曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ideal performance curve before and after power grid disaster

根据这3个特点,可将弹性量化在时间 $t_0 \sim t_3$ 内,电网性能曲线 $P_R(t)$ 与时间轴的积分:

$$R(T) = \int_{t_0}^{t_3} P_R(t) dt \quad (1)$$

为了能够更直观反应灾前-灾后电网弹性的变化,本文使用的电力系统运行期弹性量化评价指标为实际性能曲线的弹性与理想情况下性能曲线弹性之比,即:

$$R(T) = \frac{\int_{t_1}^{t_3} P_R(t) dt}{\int_{t_1}^{t_3} P_T(t) dt} \quad (2)$$

## 2 节点攻击策略

针对复杂网络的研究多是基于Barabasi提出的择优连接机制<sup>[18]</sup>,模型定义网络中心节点是拥有大量连接边的节点,即度中心性,但并不是所有显示网络的特征都能通过这种简单机制得到合理解释。因此研究者相继提出了其他网络中心性判据。

### (1) 度中心性(Degree Centrality, DC)

度中心性,即与节点 $v$ 相连的边数与总节点数 $n-1$ 之间的比值。节点 $v$ 的度中心性量化为:

$$C_D(v) = \frac{\text{deg}(v)}{n-1} \quad (3)$$

式中: $n$ 为网络的节点数; $\text{deg}(v)$ 为与节点 $v$ 相连的边数。节点 $v$ 与其他节点的连接的边数越多,则度中心性越高。

### (2) 介数中心性(Betweenness Centrality, BC)

介数中心性定义为网络中2个节点之间最短路径中经过节点 $v$ 的次数占所有最短路径总数的比例,节点 $v$ 的介数中心性量化为:

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{s-t}(v)}{\sigma_{s-t}} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{s-t}$ 为节点 $s$ 到节点 $t$ 最短路径的个数; $\sigma_{s-t}(v)$ 为节点 $s$ 到节点 $t$ 最短路径中经过 $v$ 的个数。若节点 $v$ 连接任意2节点的中继次数越多则介数中心性越高。

### (3) 接近中心性(Closeness Centrality, CC)

接近中心性是基于网络节点到达其他节点所需路径综合的差异性,利用节点间的距离大小来确定中心性的一种度量方式,量化为:

$$C_C(v) = \sum_{y \neq v} \frac{1}{d(y, v)} \quad (5)$$

式中: $d(y, v)$ 为节点 $y$ 到节点 $v$ 的距离。若节点 $v$ 越能快速达到其他节点,则其接近中心性也越大。

### (4) 特征向量中心性(Eigenvector Centrality, EC)

设复杂网络具有 $n$ 个节点, $\mathbf{A}$ 为网络的邻接矩阵。其中,节点对 $(i, j)$ 之间存在连接,则 $a_{ij}=1$ ,否则为0; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 表示 $\mathbf{A}$ 的特征值,且每个特征值 $\lambda_i$ 对应的特征向量为 $\mathbf{a}=(e_1, e_2, \dots, e_n)$ ,其关系为:

$$\lambda x_i = \sum_{j=1}^N A_{i,j} e_j \quad (6)$$

则节点 $v$ 的特征向量中心性量化为:

$$C_E(v) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^N A_{v,j} e_j \quad (7)$$

式中: $\lambda$ 为最大特征值。若节点 $v$ 拥有高价值的节点越多则其特征向量中心性越大。

### (5) 卡茨中心性(Katz Centrality, KC)

卡茨中心性通过计算节点 $v$ 的第 $k$ 阶邻居数量来衡量该节点在网络中的相对重要程度,第 $k$ 阶邻居对节点 $v$ 的影响以 $\alpha_k$ 递减,衰减率 $\alpha$ 一般取0.5。节点 $v$ 的卡兹中心性量化为:

$$C_K(v) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=1}^n \alpha^k (A^k)_{v,j} \quad (8)$$

分别计算所选算例系统的度中心性、介数中心

性、接近中心性、特征向量中心性和卡茨中心性后可以得到基于对应节点中心性的节点攻击序列。

对攻击方式的评价有 4 个指标: (1) 完全攻陷速度: 每次攻击各负荷损失率线性回归的斜率; (2) 快速瘫痪能力: 达到总负荷 60% 损失时的攻击次数; (3) 攻击效率: 100% 负荷损失时所需攻击次数的倒数; (4) 攻击稳定性: 负荷损失增量的标准差。

按上述指标生成各个攻击序列的能力图, 以其面积选择对系统性能最不利的攻击策略, 面积越大则代表对系统性能越不利。

### 3 广义储能模型

广义储能<sup>[19-20]</sup>泛指一切能够改变电能时空特性, 并在电能供需之间发挥缓冲作用的设备和措施, 包括狭义储能、需求侧管理、电动汽车充放电管理、多能源互联系统(包括电转热储能、电转气储能等等)。本文考虑的广义储能包括狭义储能和需求侧响应。通过需求侧响应, 在电力需求量较大时适当提高电价使部分电力用户主动切除不必要的负荷。若大部分电力用户根据自身对于电价的敏感程度主动参与需求响应, 减少其用电需求, 则累加效果相当于在系统中接入了等量规模的狭义储能设备。

#### 3.1 电力用户对电价的响应

经济学中需求量受到多因素的影响, 如式(9)所示:

$$Q = f(P, P_1, P_2, E, I, W) \quad (9)$$

式中:  $Q$  为商品需求量;  $P$  为商品价格;  $P_1$  为替代商品价格;  $P_2$  为其互补商品价格;  $E$  为对商品的预期价格;  $I$  为消费者的购买能力;  $W$  为消费者对商品的偏好。其中需求量  $Q$  对商品价格  $P$  最为敏感, 一般需求量与价格间为反比关系。由于国内电力市场尚未成熟, 其垄断地位和刚性需求使需求量可看作只受价格影响, 即用电量仅反比于电价。

通过统计电价与用电量数据, 利用商业软件 SPSS 通过多项式回归模型建立两者之间的假设关系, 其数学模型如式(10)所示:

$$P_{ld} = \sum_{i=0}^{c-1} a_i P_r^i + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (10)$$

式中:  $\varepsilon$  为服从正态分布的随机误差;  $c$  为给定常数, 用于确定回归方程系数的个数;  $P_{ld}$  为电价  $P_r$  下的用电量;  $a_i$  为第  $i$  次项电价  $P_r^i$  的系数。

多项式回归后, 对拟合方程进行显著性检验, 以决定回归方程的可信度。根据统计理论, 一般根据回归分析的总离差平方和构造  $F$  统计量验证回归方程的可信度或用复相关系数  $R$  说明拟合效果。

#### (1) $R$ 检验

样本数据总离差平方和( $TSS$ )可分解为回归平方和( $ESS$ )和残差平方和( $RSS$ ), 如式(11)所示:

$$TSS = \sum_{i=1}^m (P_{ld,i} - \bar{P}_{ld})^2 = \sum_{i=1}^m (P_{ld,i} - \hat{P}_{ld,i})^2 + \sum_{i=1}^m (\hat{P}_{ld,i} - \bar{P}_{ld})^2 = RSS + ESS \quad (11)$$

式中:  $m$  为用电量样本总数;  $\hat{P}_{ld,i}$  为第  $i$  个用电量的估计值;  $P_{ld,i}$  第  $i$  个用电量的实际值;  $\bar{P}_{ld}$  为用电量样本均值。

当回归方程能够完全拟合用电量样本数据时,  $RSS=0$  且  $TSS=ESS$ 。因此, 若  $RSS$  占  $TSS$  的比重越小, 拟合效果越好, 用  $R^2$  描述回归方程的显著性, 如式(12)所示:

$$R^2 = ESS/RSS \quad (12)$$

$R^2$  越大, 多项式回归后得到的用电量—电价响应曲线拟合度越好, 可信度越高。

#### (2) $F$ 检验

根据多元统计理论, 若取  $X_i = x^i$ , 则实际模型的一元多项式非线性回归问题简化为多元线性回归问题。可根据多元线性回归方程的显著性检验统计量来检验多项式回归方程的显著性。

假设  $H_0: a_1=a_2=\dots=a_c=0$ , 假设  $H_1: a_1, a_2, \dots, a_c$  中, 存在  $a_i \neq 0, i \in [1, c]$ , 检验  $F$  检测量为:

$$F = \frac{ESS/c}{RSS/(m-c-1)} \cdot F(p, m-c-1) \quad (13)$$

在给定置信水平  $\alpha$  后, 若检测量  $F > F_\alpha(p, m-c-1)$ , 则拒绝  $H_0$ , 认为用电量—电价响应曲线在置信水平  $1-\alpha$  上是显著的。

用电量—电价响应曲线确定后,另外还需在需求侧响应模型中增加电价上下限约束,即:

$$P_{r,\min} \leq P_r \leq P_{r,\max} \quad (14)$$

式中:  $P_{r,\max}$  和  $P_{r,\min}$  分别为电价允许的上下限。

### 3.2 狭义储能系统模型

储能系统的功率和储存的能量需要满足式(15)~(17)约束:

$$P_k^{c,\min} \leq P_k^c(t) \leq P_k^{c,\max} \quad (15)$$

$$P_k^{d,\min} \leq P_k^d(t) \leq P_k^{d,\max} \quad (16)$$

$$E_k^{\min} \leq E_k(t) \leq E_k^{\max} \quad (17)$$

式中:  $E_k^{\max}$ ,  $E_k^{\min}$  为储能设备  $k$  的容量上下限;  $P_k^{c,\max}$ ,  $P_k^{c,\min}$  为充电功率上下限;  $P_k^{d,\max}$ ,  $P_k^{d,\min}$  为放电功率上下限;  $P_k^c(t)$ ,  $P_k^d(t)$  为  $t$  时段充、放电功率。

储能设备  $k$  存储能量满足一阶差分:

$$E_k(t+1) = E_k(t) - P_k^d(t) / \eta_k^d + \eta_k^c P_k^c(t) \quad (18)$$

式中:  $E_k(t)$  为  $t$  时段存储能量;  $\eta_k^c$  和  $\eta_k^d$  为充、放电效率。

初始时段( $t=1$ )储能设备存储的电量为:

$$E_k(1) = E_{k,0} \quad (19)$$

式中:  $E_{k,0}$  为储能设备  $k$  的初始电量。

## 4 运行期优化模型的建立与求解

本文将电力系统运行期分为灾前,灾时与灾后 3 个阶段:灾前对电力系统的优化采用以费用最小为目标,基于直流潮流的含储能机组组合模型;当某时刻电力系统遭受攻击后,立即投入需求侧响应机制和仍有余量的储能系统以承受和抵御灾难;在灾后恢复阶段,将电网运行弹性最大化作为优化目标,寻找使系统运行弹性最大化的最优修复序列。

### 4.1 灾前机组组合模型与求解

灾前阶段考虑的目标函数包含机组耗量成本、启停成本以及储能系统的充放电成本。

$$\min f = f_p(P_G) + f_{uc}(u, v, w) + f_s(E_0, P^d, P^c) \quad (20)$$

$$\text{其中: } f_p(P_G) = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I^t} C_p^{t,i}(P_G^{t,i}) - C_p^{t,i}(0) \quad (21)$$

$$f_{uc}(u, v, w) = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I^t} (C_p^{t,i}(0)u^{t,i} + C_v^{t,i}v^{t,i} + C_w^{t,i}w^{t,i}) \quad (22)$$

$$f_s(E_0, P^d, P^c) = C_{s0}^T E_0 + C_{sc}^T P^c - C_{sd}^T P^d \quad (23)$$

式中:  $f_p$  为发电成本;  $f_{uc}$  为机组组合带来的启停成本;  $f_s$  为电池充放电成本;  $T$  为总时段数;  $I^t$  为  $t$  时段内所有可调度的机组集合(包括发电机、储能);  $C_p^{t,i}$  为  $t$  时段内机组  $i$  发出的有功功率  $P_G$  所对应的耗量特性函数;  $C_p^{t,i}(0)$  为  $t$  时段下机组  $i$  的空载成本;  $C_v^{t,i}$  和  $C_w^{t,i}$  为  $t$  时段下机组  $i$  的启、停机成本;  $u^{t,i}$  为时段  $t$  下机组  $i$  的运行状态, 1 为运行, 其余状态为 0;  $v^{t,i}$  为时段  $t$  下机组  $i$  的启机状态, 1 为启机, 其余状态为 0;  $w^{t,i}$  为时段  $t$  下机组  $i$  的停机状态, 1 为停机, 其余状态为 0;  $C_{s0}$  为已存储的初始电量带来的费用;  $C_{sc}$  和  $C_{sd}$  为储能充、放电价格。

约束条件中包括直流潮流的等式约束式(24)以及线路容量、相角、机组出力上下限、机组爬坡等的不等式约束式(25)~(28)。

$$B\theta + A_{ld}P_{ld} - A_G P_G = 0 \quad (24)$$

式中:  $B\theta$  为直流支路潮流;  $A_{ld}$ ,  $A_G$  对应负荷和发电机的位置, 若发电机或负荷  $j$  位于节点  $i$  处则矩阵中  $(i, j)=1$ 。储能充电时作为负荷、放电时为电源。

不等式约束包括:

$$|B\theta| \leq P_{\max} \quad (25)$$

$$\theta_{i,\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i,\max} \quad (26)$$

$$u^{t,i} P_{G,\min}^i \leq P_G^i \leq u^{t,i} P_{G,\max}^i \quad (27)$$

$$|P_G^{t,i} - P_G^{(t-1),i}| \leq \Delta P_G^i \quad (28)$$

式中:  $P_{\max}$  为线路最大容量;  $\theta_i$  为节点  $i$  的相角。

另外, 约束还包括 3.2 节中的式(15)~(19)。最后, 通过 MOSEK 求解器对该含储能机组组合模型进行优化计算, 可以得到灾时储能系统的剩余容量。

### 4.2 灾时及灾后弹性优化模型与求解

#### 4.2.1 灾时容灾阶段

攻击发生后到修复前, 系统需要一定的响应时间。在这段时间内, 通过利用广义储能的时空调节特性, 提高该期间系统性能曲线, 方法如图 2 所示。

攻击发生时, 首先衡量灾前正常运行时的储能电量能否满足当前用户需求, 从而维持电网正常运行。若储能容量充足, 则继续模拟下一轮攻击, 直至储能难以满足用户需求, 通过适当提高电价进行需求侧响应, 若仍然无法维持电网运行, 则切负荷。该方案持续到攻击结束, 然后进入灾后恢复阶段。

#### 4.2.2 灾后恢复阶段

修复时, 以式(2)系统运行期弹性最大化作为目标函数, 以式(10), (14)以及去除机组组合后的式(24)~(27)作为约束条件, 寻找使系统弹性最大化的修复方案。模型算法原理如图 3 所示。

step 1: 将断开的故障节点进行编号, 并将编号排列成为基因, 随机生成  $n$  组基因, 每组基因都

是一种修复方案;

step 2: 将生成的  $n$  组基因逐个代入系统进行仿真模拟, 可以得到修复期的系统性能曲线, 通过式(2)计算每组基因的适应度;

step 3: 按照 step 2 求出的适应度对随机生成的  $n$  组基因进行选择。将拥有最大适应度值的  $\lambda$  组精英基因直接作为下一代个体而不用交叉变异。其余通过轮盘赌原则选择, 其步骤为: 首先, 计算各基因适应度与总适应度的比值作为该基因遗传到下一代的概率; 然后, 计算基因  $i$  的累计概率  $q_i$  构造轮盘; 最后, 生成  $[0,1]$  之间均匀分布的随机数  $r$ , 若  $r < q_1$ , 则选择基因 1, 否则选择基因  $j$ , 满足  $q_{j-1} < r < q_j$ , 共重复  $n-\lambda$  次;

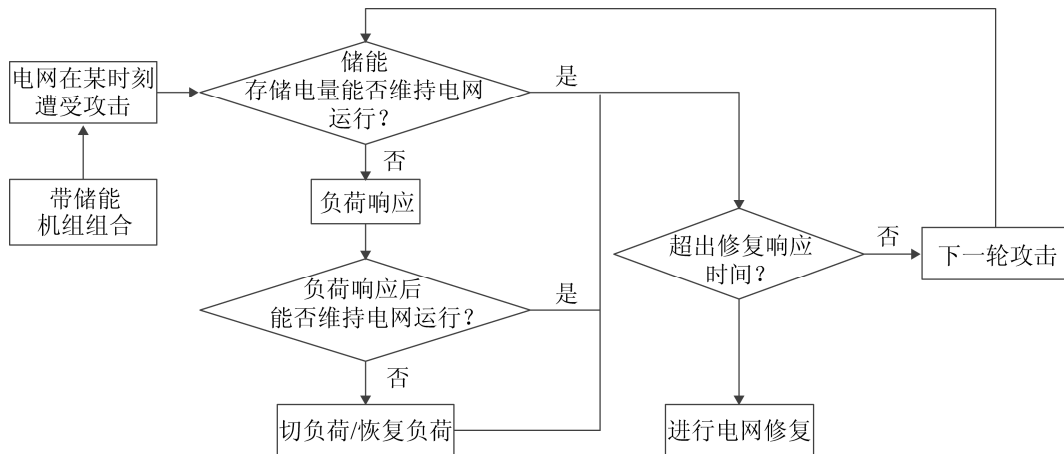


图 2 攻击发生后到修复开始前弹性改善方案

Fig. 2 Resilience improvement from attack occur to repair start

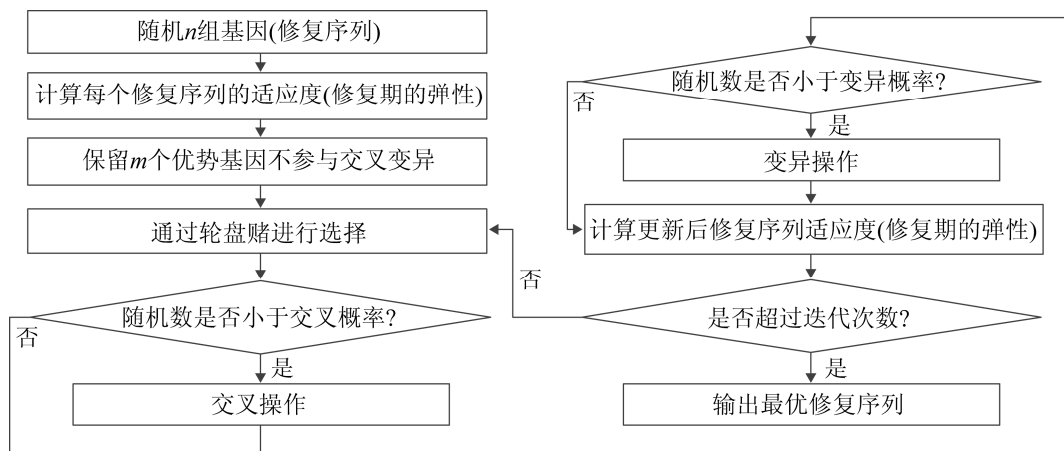


图 3 遗传算法框图

Fig. 3 Flow diagram of genetic algorithm



step 4: 将轮盘赌选择出的基因两两交叉操作。交叉操作依赖于设定的交叉概率,若随机数小于交叉概率则进行交叉。交叉时第1个子代继承第1个个体较长的基因串,并将其较短的基因串中的标号按照在第2个父代个体中出现的顺序重新排列并继承;第2个子代则反之进行。为保证种群规模不衰减,应产生  $n-\lambda$  组基因;

step 5: 对交叉得到的新基因进行变异操作,变异操作依赖于设定的变异概率,若随机数小于变异概率则随机互换该基因中两位点的位置。

重复 step 2~5, 直到达到最大迭代次数。

## 5 算例分析

以 IEEE-30 节点系统为例进行分析,系统拓扑如图 4 所示。

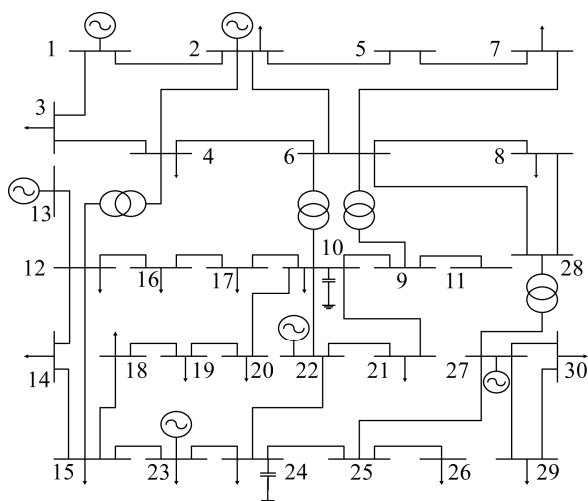


图 4 IEEE-30 节点系统拓扑结构  
Fig. 4 Topology of IEEE 30-bus system

线路参数按照 IEEE-30 节点标准系统设定;机组中 13, 22, 23 节点改为风力发电机,各时段风机出力曲线如图 5 所示,其余 1, 2, 27 节点为火力发电机,最大出力分别为 80 MW, 80 MW 和 55 MW,最小启动/停机时间分别为 5 h, 6 h 和 1 h。

负荷节点典型日最大有功负荷按 IEEE-30 节点标准系统预设值给定。负荷率曲线如图 6 所示。

各时段负荷按最大有功负荷与各时段负荷率的乘积设定,每个负荷节点处均安装储能设

备,储能容量为该节点所带负荷最大值的 30%,各储能设备的充放电效率为 95%,充放电成本为 10 \$/kWh。

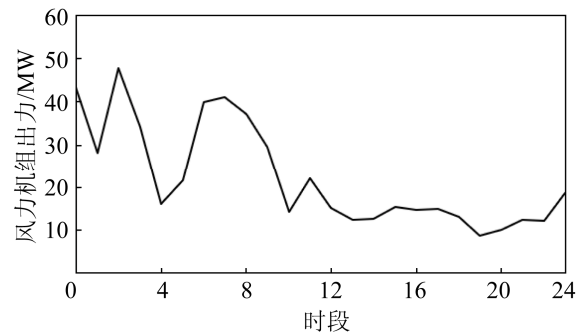


图 5 风力机组出力曲线  
Fig. 5 Output of wind power curve

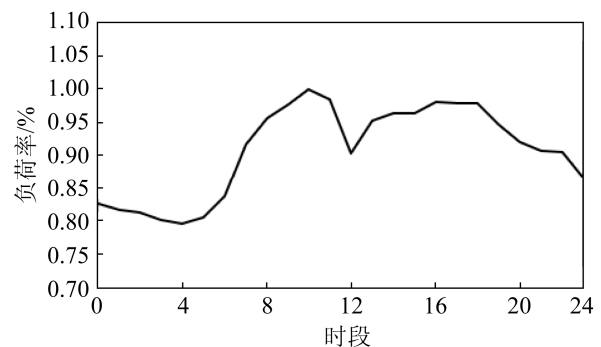


图 6 典型日负荷率曲线  
Fig. 6 Typical daily load rate curve

表 1 引用文献[21]中电价—用电量响应数据,依据文献[22]中售电量结构得到全社会综合用电中居民用电占 26.5%,农业用电占 10.2%,工业用电占 55.7%,商业用电占 7.7%,据此进行多项式回归。

表 1 文献[21]用电量—电价响应数据

Tab. 1 Response between power used and price in Ref.[21]

电价 $P_r$ (标么值)	用电量 $P_{id}$ (标么值)			
	居民 用户	农业 用户	工业 用户	商业 用户
0.235	1.307	1.400	1.308	1.000
0.308	1.258	1.397	1.257	1.000
0.370	1.248	1.391	1.148	1.000
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.630	0.593	0.307	0.812	1.000
1.692	0.580	0.300	0.590	1.000
1.765	0.538	0.300	0.539	1.000

利用数据统计分析软件 SPSS, 将数据进行多项式回归后得到需求侧响应函数, 即:

$$P_d = -0.5378P_r^3 + 1.4723P_r^2 - 1.5162P_r + 1.5828 \quad (29)$$

经过  $R$  检验得到  $R^2=0.996$  显示拟合度好, 在给定显著性水平  $\alpha=0.05$  进行  $F$  检验显示回归显著, 方程具有实际意义。

计算 IEEE-30 节点系统拓扑的各节点中心性, 并以此作为攻击策略, 对算例系统中的节点发起攻击, 灾后节点以及与节点连接的线路全部断开, 模拟灾后得到负荷损失率曲线, 如图 7 所示。

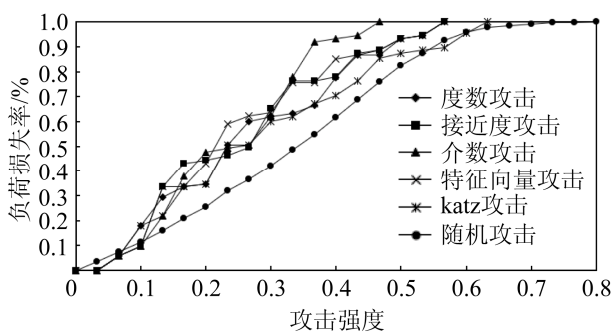


图 7 6 种攻击方式下的负荷损失率  
Fig. 7 Load loss rate under 6 attack modes

图 7 中攻击强度为当前攻击次数与总次数的比值, 随机攻击中每一个点是模拟 100 次后的均值。根据负荷损失率曲线以及对攻击方式的 4 个评价指标可得 6 种攻击方式的能力图, 如图 8 所示。

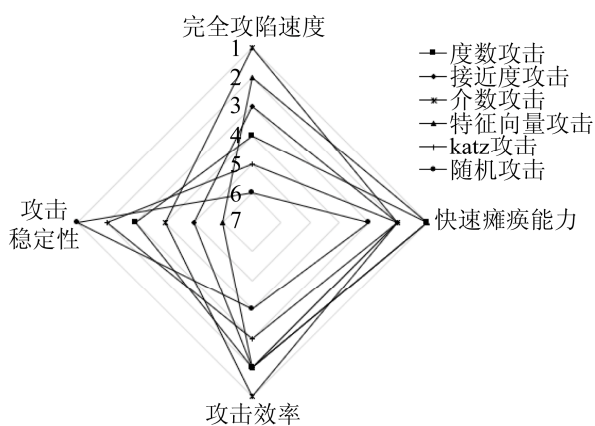


图 8 6 种攻击方式的能力图  
Fig. 8 Capability map of 6 attack modes

计算各攻击方式下能力图所包围的面积: 基于介数中心性的攻击策略的综合评价最高, 面积为

49.5 个单位; 随机攻击的综合评价最低, 面积为 22.5 个单位。介数节点攻击策略如图 9 所示, 红圈越大, 攻击越优先, 但跳过发电机节点。

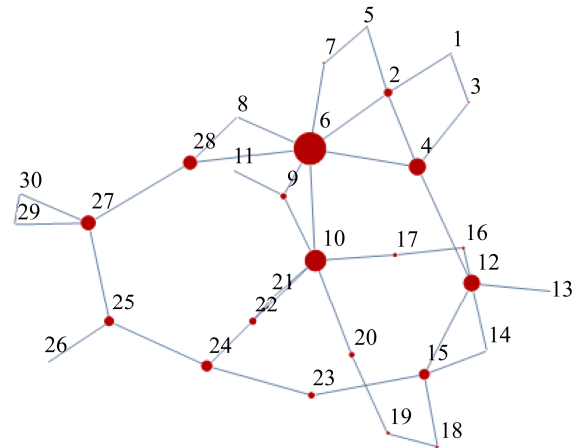


图 9 基于介数中心性的节点攻击策略  
Fig. 9 Node attack strategy based on betweenness centrality

针对本文算例系统的攻击策略确定后, 设定系统运行后第 10 个时段开始攻击, 前 9 个时段按以发电成本最小的机组组合进行调度, 在前 9 个时段机组出力及储能系统存储的电量如图 10~11 所示。

图 10 中机组 1, 2, 3 指的是节点 1, 2, 22 上的火力机组, 机组 4, 5, 6 指的是节点 27, 23, 13 上的风力机组。

电价标幺值允许在 1.0~1.8 pu 区间变动时, 容灾阶段通过广义储能的时空调节特性容纳部分攻击产生的后果。时段 10 开始共攻击 10 次, 图 12 显示广义储能投入与否对系统负荷率曲线的影响。

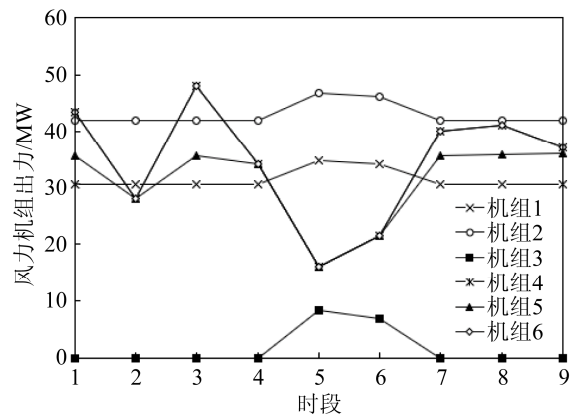


图 10 灾前机组出力曲线  
Fig. 10 Power curve before attack

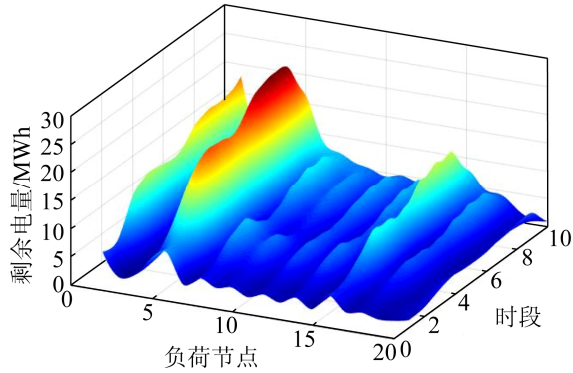


图 11 灾前储能设备剩余电量  
Fig. 11 Electricity stored before attack

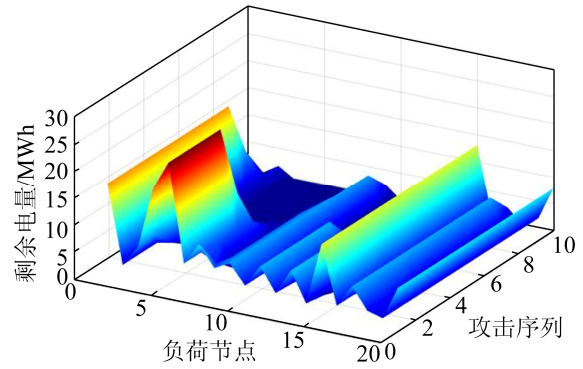


图 14 容灾阶段储能剩余电量  
Fig. 14 Electricity stored in disaster tolerance stage

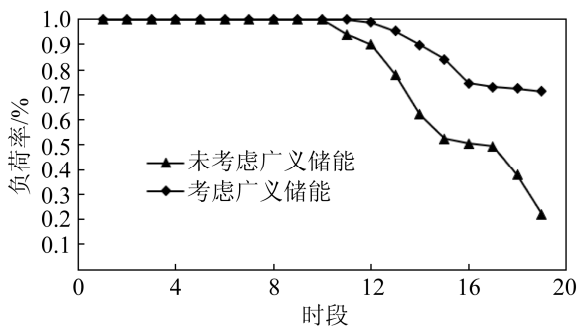


图 12 广义储能引入前后容灾阶段性能曲线  
Fig. 12 Performance curve of disaster tolerance stage before and after using generalized energy storage

容灾期间电价响应如图 13 所示, 储能设备剩余电量如图 14 所示。通过式(2)可计算出容灾阶段, 若不考虑广义储能时弹性为 0.639 9, 考虑广义储能后弹性提高至 0.860 1, 系统弹性改善显著。

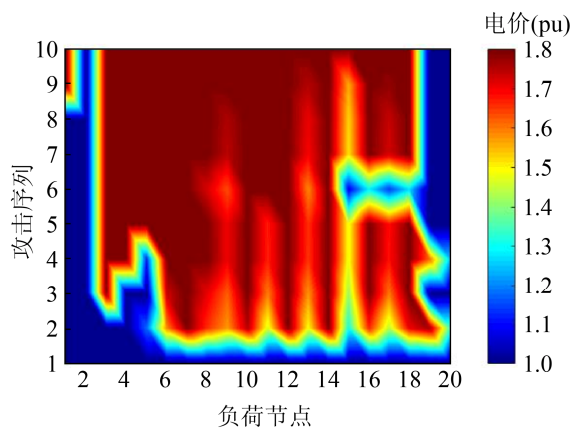


图 13 容灾阶段电价响应  
Fig. 13 Electricity price response in disaster tolerance stage

进入修复阶段后, 共 22 个节点待修复, 对修复序列进行寻优。基本参数设定为每一代基因总数为 50, 最大迭代次数为 1 000, 交叉概率 0.5%, 变异概率 0.6%, 精英基因占总基因的比重为 4%, 适应度函数为式(2), 将末代中进化出最大弹性的基因作为最佳修复次序, 适应度迭代曲线如图 15 所示。

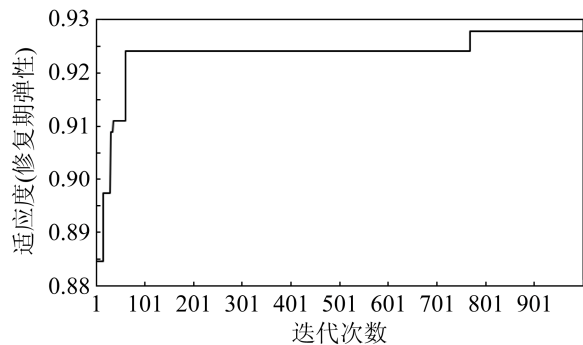


图 15 遗传算法适应度迭代曲线  
Fig. 15 Fitness iteration curve of genetic algorithm

得到最佳修复次序为 4, 6, 7, 12, 17, 8, 15, 18, 10, 28, 9, 11, 26, 19, 2, 20, 5, 16, 23, 25, 14, 13, 按该修复序列对灾后的系统进行修复后作性能曲线图, 并与基于各节点中心性修复进行比较, 如图 16 所示。其中, 基于度数中心性、接近中心性、介数中心性、特征向量中心性和卡茨中心性进行修复的弹性分别为 0.867, 0.881, 0.871, 0.883, 0.867。通过遗传算法进行优化后的修复序列修复期弹性为 0.928, 从图 16 可看出优化修复后的性能曲线明显高于其他曲线, 验证了优化修复策略的有效性。

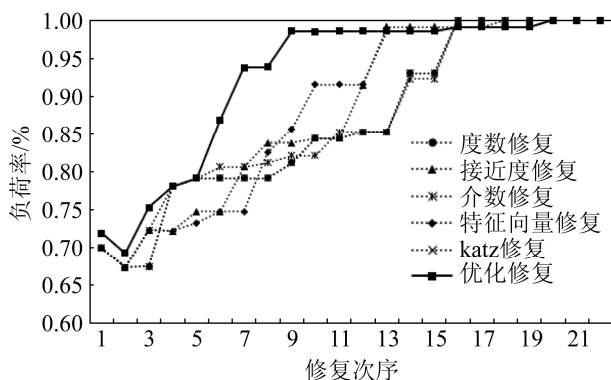


图 16 修复阶段性能曲线

Fig. 16 Performance curve in repair stage

## 6 结论

本文通过引入广义储能建立了一种发生灾难后, 电力系统从容灾到恢复的全阶段运行期弹性优化方法, 并以 IEEE-30 节点系统为算例分析验证了方法的正确性和有效性, 研究得到以下结论:

(1) 传统电力系统因其发一输一配一变一用的同时进行, 对于小范围灾难有成熟的解决方案, 但对于小概率大范围的人为攻击很难将灾害控制在可接受的水平, 通过广义储能的时空调节特性能够大幅提升灾后电网容灾能力, 效果显著;

(2) 由于灾后拓扑发生改变, 按原攻击方案的顺序进行修复并不能最优地改善系统修复期弹性。通过本文提出的基于遗传算法的弹性优化模型, 寻优最佳修复序列可明显改善修复期弹性。

本文优化模型基于简化直流潮流, 对潮流计算误差较大。此外, 包括遗传算法在内的人工智能算法较容易陷入局部最优, 需开展进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 薛禹胜, 肖世杰. 从印度大停电透视电力系统的广义阻塞[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 1-8.  
Xue Yusheng, Xiao Shijie. Through the India's Blackout to Perceive the Generalized Congestions in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 1-8.
- [2] 林伟芳, 孙华东, 汤涌. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.  
Lin Weifang, Sun Huadong, Tang Yong. Analysis and Lessons of the Blackout in Brazil power Grid on

- November10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [3] 方勇杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.  
Fang Yongjie. Lessons from September 8, 2011 Southwest America Blackout Prevention and Control of Cascading Outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [4] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.  
Zhou Jian, Luo Tianyun, Li Zhiyong, et al. Comprehensive Evaluation of Power Failure Based on Improved Extension Analytic Hierarchy Process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.
- [5] Bie Z, Lin Y, Li G, et al. Battling the Extreme: a Study on the Power System Resilience[J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2017, 105(7): 1253-1266.
- [6] 苏盛, 吴长江, 马钧, 等. 基于攻击方视角的电力 CPS 网络攻击模式分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3115-3120.  
Su Sheng, Wu Changjiang, Ma Jun, et al. Attacker's Perspective Based Analysis on Cyber Attack Mode to Cyber-physical System[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3115-3120.
- [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.
- [8] 田继伟, 王布宏, 李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 50-56.  
Tian Jiwei, Wang Buhong, Li Xia. State-preserving Topology Attacks and its Impact on Economic Operation of Smart Grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 50-56.
- [9] Harris S. Military-Style Raid on California Power Station Spook US[EB/OL]. [2013-12-27]. <http://foreignpolicy.com/2013/12/27/military-style-raid-on-california-power-station-spooks-u-s/>.
- [10] 王勇, 王钰茗, 张琳, 等. 乌克兰电力系统 BlackEnergy 病毒分析与防御[J]. 网络与信息安全学报, 2017, 3(1): 46-53.

- Wang Yong, Wang Yuming, Zhang Lin, et al. Analysis and Defense of the BlackEnergy Malware in the Ukrainian Electric Power Tystem[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2017, 3(1): 46-53.
- [11] 卢志刚, 刘照拯, 张晶. 含分布式电源的配电网灾后分阶段抢修策略[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(1): 69-74.  
Lu Zhigang, Liu Zhaozheng, Zhang Jing. Staged Rush Repair Strategy of Distribution Networks with Distributed Generators After Disaster[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(1): 69-74.
- [12] 彭寒梅, 王小豪, 魏宁. 提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2328-2335.  
Peng Hanmei, Wang Xiaohao, Wei Ning. Microgrid Differentiated Recovery Operation for Enhancing Distribution System Resilience[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [13] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43.  
Lu Zhigang, Dong Yuxiang. Distribution System Restoration Based on Improved Binary Particle Swarm Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [14] 张晶. 基于效用理论的灾后配电网多故障抢修实时调整策略研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
Zhang Jing. Utility Theory Based Rush Repair Strategy of Post-disaster Distribution Networks with the Real-time Adjustment[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [15] Holling C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics (S1543-592X), 1973, 4(1): 1-23.
- [16] Bruneau M, Change S E, Eguchi R T, et al. Metrics for Energy Resilience[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2014, 7(72): 249-256.
- [17] Department of Homeland Security. National Infrastructure Protection Plan[R]. Washington D.C: Department of Homeland Security, 2009.
- [18] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks[J]. Science (S1095-9203), 1999, 286(5439): 509-512.
- [19] 孙伟卿, 向威, 裴亮, 等. 电力辅助服务市场下的用户侧广义储能控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 68-75.  
Sun Weiqing, Xiang Wei, Pei Liang, et al. Generalized Energy Storage Control Strategies on User Side in Power Ancillary Service Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 68-75.
- [20] 孙伟卿, 裴亮, 向威, 等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 47-58.  
Sun Weiqing, Pei Liang, Xiang Wei, et al. Evaluation Method of System Value for Energy Storage in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 47-58.
- [21] 王天娇. 基于需求侧的微电网经济运行优化研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
Wang Tianjiao. Research on Economical Operation Optimization of Microgrid Based on Demand Side[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [22] 覃彪. 电力市场中用户对电价的响应及停电损失问题的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2001.  
Qin Biao. Study on User's Response to Electricity Price and Electricity Interruption Loss and Compensation in Electricity Market[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2001.