

考虑多种攻击策略的国防工程电力系统网架生存性评估

李飞, 陈童

引用本文

李飞, 陈童. 考虑多种攻击策略的国防工程电力系统网架生存性评估[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230700171-8.

LI Fei, CHEN Tong. Survivability Evaluation of National Defense Engineering Power System Grid Considering Multiple Attack Strategies [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230700171-8.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[自动化红队测试中强化学习策略的实现与验证](#)

Implementation and Verification of Reinforcement Learning Strategy in Automated Red Teaming Testing

计算机科学, 2023, 50(11A): 230200162-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230200162>

[基于智能体的舰船任务可靠度仿真系统设计](#)

Design of Ship Mission Reliability Simulation System Based on Agent

计算机科学, 2023, 50(11A): 220800272-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800272>

[基于对比学习的超多类深度图像聚类模型](#)

Super Multi-class Deep Image Clustering Model Based on Contrastive Learning

计算机科学, 2023, 50(9): 192-201. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220900133>

[Pauli噪声环境下任意二粒子受控短距离隐形传态](#)

Controlled Short-distance Quantum Teleportation for Arbitrary Two-particles State in Pauli Noise Environment

计算机科学, 2023, 50(6A): 220700024-4. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220700024>

[基于双重二维混沌映射的压缩图像加密方案](#)

Compressed Image Encryption Scheme Based on Dual Two Dimensional Chaotic Map

计算机科学, 2022, 49(8): 344-349. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700235>

考虑多种攻击策略的国防工程电力系统网架生存性评估

李飞 陈童

海军工程大学管理工程与装备经济系 武汉 430033

摘要 针对战时国防工程电力系统网架技术性能评估问题,尤其是生存性指标量化评估问题,提出了国防工程电力系统网架生存性多指标综合评价方法,从抗毁性、安全性和恢复性3个维度衡量国防工程电力系统网架生存性,并考虑敌方可能采取的多重攻击策略,得到国防工程电力系统网架生存性量化指标随等效攻击波次变化曲线,可对国防工程电力系统网架的运行和改进决策提供分析方法和工具;并采用该方法对某国防工程电力系统网架进行仿真实验,实验结果表明,该方法可有效评估多种攻击策略下的国防工程电力系统网架的生存性,网架结构信息保密和网架防护等级对国防工程电力系统网架生存性有较大影响。

关键词 国防工程;电力系统网架;生存性评估;抗毁性;安全性;恢复性;攻击策略

中图分类号 TM715

Survivability Evaluation of National Defense Engineering Power System Grid Considering Multiple Attack Strategies

LI Fei and CHEN Tong

Department of Management Engineering and Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract The survivability evaluation of the national defense power grid is an important part of the military technical performance evaluation of the national defense power system. In this paper, a comprehensive multi-indicator evaluation index system for grid survivability is established by considering several possible enemy attack strategies and analyzing various characteristics of the grid. The survivability evaluation is quantified in 3 dimensions: invulnerability, security, and recoverability. The simulation analysis is performed for a specific type of power grid. Simulation experiment results show that the assessment method is effective and can provide a convenient method for grid optimization of national defense power grid.

Keywords National defense engineering, Power system grid, Survivability evaluation, Invulnerability, Security, Recoverability, Attack strategy

1 引言

近年来兴起的系统生存性(Survivability)主要研究系统出现突发事故或遭受攻击时,根据给定要求持续提供服务的能力^[1]。生存性评估用于评价系统在遭受各种扰动下完成其关键任务的能力,国防工程电力系统网架是国防工程的重要组成部分,面临战场毁伤、极端自然灾害和系统故障等威胁,尤其是战时敌方可能采取的多重攻击毁伤,对国防工程电力系统网架生存性有重大影响。对于已建成的国防工程电力系统网架进行生存性评估,对国防工程电力系统运行和改进决策都有着重要意义。

国防工程电力系统网架生存性评估主要涉及两个方面的内容:

1) 电网生存性评估。生存性评估在电网中的应用开始于电力通信网的生存性分析,后逐渐发展应用到电网结构生存性评估^[2]、骨干网架搜索^[3]、电网防灾规划^[4]和相互依赖的能源网络优化^[5-6]等方面。当前,在开展电网生存性评估时,主要有两个角度:(1)从微观的角度,结合电网的各个元件重要度评估,通过分析电网元件的电气参数,最终综合考虑得出电网整体的生存性状态,如文献^[7-11];(2)从宏观的角度,即从

电网整体的视角俯瞰式地分析电网的某些状态特征,建立特征指标和电网生存性之间的联系,如文献^[12-13]。

2) 军事领域生存性研究。主要集中在两个方面:(1)武器装备的生存性研究。武器装备的生存性研究成果较为丰富,主要应用概率论等相关方法。例如 Arief 等对装甲车在爆炸载荷下对人员的生存能力进行分析^[14];Yang 等对无人机惯性导航系统执行任务策略进行了研究,基于系统性能监测和系统使用时间,通过精心制定的任务中止计划,在任务成功的可能性和系统生存性之间取得了平衡^[15];Zhao 等基于系统生存性和任务完成率,对执行任务的飞机的最优中止策略进行研究^[16];He 对飞行器广义生存性评估方法进行了研究,从实际作战环境和作战链路出发,引入威胁有效性,建立了多因素的飞行器广义生存性的表征模型和评估方法等^[17]。(2)军事网络系统的生存性研究。研究对象为军事通信网络、军事指挥系统、舰船电网等系统。主要基于复杂网络理论、灵活的应用图论等理论方法,如 Nitin 等在文献^[18]中对军事战场环境下的无线传感器网络系统生存性进行了研究,探讨了网络中死节点数量变化对网络的生存性和平均网络能量的影响;Shi 等对军用无人值守无线传感器网络系统生存性关键技术展开了研究,从失效节点检测和可重构路由由两方面的生

存性增强技术,来提高资源受限的无人值守无线传感器网络系统的生存性,并针对无人值守无线传感器网络系统设计了生存性评估方案^[19]。

当前生存性评估指标体系构建方法较多,Mark等在文献[2]中根据领域特定品质因数的退化程度和速率来量化生存能力,可用于功能确定领域的生存性评估;Chen等^[20]从抵抗性、安全性和恢复性3个方面建立生存性评估指标体系,但其优化目标为兼顾网架线路总长度最短和生存性综合指标最大,与国防工程电力系统网架的需求不同;Dong等在文献[21]中从抵抗性、恢复性和连通性3个方面建立生存性评估指标体系,并采用改进的BBO算法进行优化分析,但其指标主要考虑系统内部电力参数运行安全,未考虑外部环境因素;Lou等^[22]以最大化骨干网架规划的经济性、生存性、抗毁性以及可恢复性为多目标函数,考虑网络连通性约束、重要节点和支路保留约束以及系统安全运行约束,得到骨干网架规划策略的Pareto最优解,具有较强借鉴意义。

综上,生存性研究已取得了一些成果,但军事领域生存性评估研究还存在以下3方面的不足:

1)专用系统的生存性评估方法研究较少。当前生存性评估的研究成果主要集中在电信领域,而电力系统作为能源传输系统与信息传输系统在网络特点方面有着本质的区别,无法将信息系统的生存性研究成果直接应用到其他系统的生存性分析之中。军事电力系统领域的应用则更少,例如国防工程电力系统建设要求有一定防护能力,这与一般的民用网络系统存在较大差异,应考虑系统的实际特点,综合多种影响因

素设计专用的生存性指标体系和评估方法。

2)生存性评估方法差异较大,从多角度多因素评估系统生存性的研究较少,主要是对系统生存性影响显著的外部因素考虑较少。大多数系统生存评估只从单一角度对系统的生存性进行评估,如电网生存性评估多数仅从电力系统角度出发,忽略了外部环境对系统生存性可能产生的显著影响。

3)战时毁伤条件下,国防工程电力系统网架建模难度较大。当国防工程电力系统网架受到外部攻击后,能承受一定攻击并转换为新网架继续运行,直至系统不能完成指定保障任务,加之诸多因素的影响,该过程中其网架结构、系统运行风险以及系统恢复能力等情况将持续变化,导致建模分析难度较大。

针对现实工程建设需求,本文提出了一种国防工程电力系统网架生存性评估多指标综合评价方法,构建了考虑抗毁性、安全性和恢复性3个维度的指标体系,对某国防工程电力系统网架进行分析建模,在生存性评估的基础上结合4种攻击策略进行仿真分析,通过仿真算例验证了方法的正确性和有效性。

2 国防工程电力系统网架特点

国防工程电力系统网架结构可以抽象成由节点和边组成的网络模型,节点表示网架中的电源、负荷和变电站,边表示网架中的电力线路。在对国防工程电力系统网架进行生存性评估时,应首先分析国防工程电力系统网架与普通电力系统网架的差异,如表1所列。

表1 国防工程电力系统网架与普通电力系统网架的主要差异

Table 1 Main differences between national defense engineering power system grid and ordinary power system grid

差异内容	国防工程电力系统网架	普通电力系统网架
面临的威胁	全方位的威胁(战时高强度的蓄意攻击和随机破坏,平时系统故障和自然灾害)	自然灾害和系统故障
系统损毁判定	重要负荷供电不能获得最低供电保障	系统网络崩溃或者供电负荷过小
负荷分布	重要负荷一般位于网络结构的边缘	负荷分布不均匀,重要负荷多位于骨干网络的核心节点
防护能力	节点防护能力较强,可抵御高烈度的攻击;线路防护能力差异较大,抵御攻击烈度不同	基本没有针对攻击的防护
运行方式	均具备“孤岛运行”条件	极端条件下,部分系统具备“孤岛运行”能力

下面以某国防工程电力系统网架为例,分析其网架结构,其网架结构如图1所示,有以下7个特点:

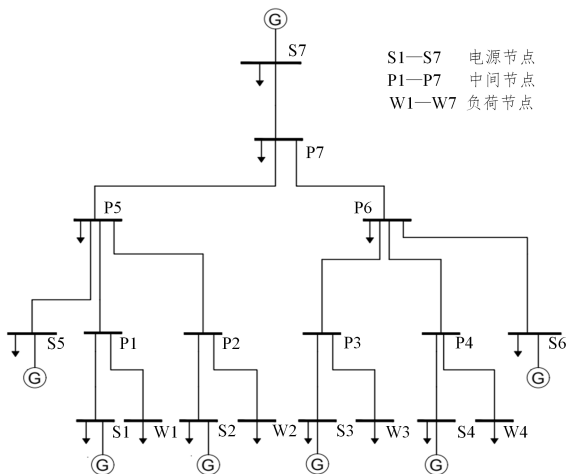


图1 某国防工程电力系统网架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a specific national defense engineering power system grid

1)多电源,系统共有7个电源节点,是典型的多电源系统,且各电源容量不同,电源在电力系统网架中分布也不均匀,其电源组合运行方式较为复杂,可行的电源运行方式多达116种。

2)多负荷,系统共有4个负荷节点,是典型的多负荷系统,但负荷运行方式较为单一,运行时必须同时保障每个负荷同时获取足够的电力供应,即系统运行时全部负荷应处于合理的运行区间。

3)网架结构呈树状结构,该网架结构较为简单,但国防工程电力系统同一节点对间均为多线路连接,又可分别运行。多电源导致网架中的电流方向多变,节点对间电流可视作双向流动。

4)网架的总规模较小,系统共18个节点,17条线路,线路总长103km,这与民用电网规模较大、节点线路众多明显不同,且实际运行中由于国防工程电力系统的规模较小,电压、频率波动对系统运行安全影响较小,也可忽略其影响。

5)系统建设有不同防护等级的设施,系统节点和线路的抗打击能力也不同,战争条件下,不同攻击策略的毁伤效果不

能简单地一次性以去边或者去点的方式衡量。

6) 备用功率较大,系统电源总功率远大于负荷的实际需求,备用功率对系统的恢复性有一定的影响。

7) 线路的传输裕度较大,国防工程电力系统在设计和建设线路时,其传输功率远大于实际需求,因此在生存性计算时可以忽略其影响。

3 指标体系

重要的国防工程是典型的多电源多负荷电力系统,为了保障国防工程电力系统中的关键负荷能够在高强度的现代化战争中安全、稳定地运行,并在遭受打击和故障后快速恢复供电,结合普通电网的生存性评估指标方法和国防工程电力系统网架的特点,可构建如图2所示的国防工程电力系统网架生存性指标体系。

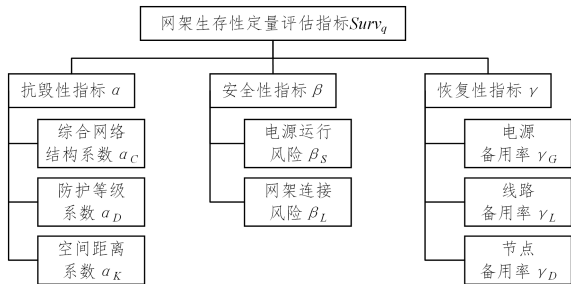


图2 国防工程电力系统网架生存性指标体系

Fig.2 Survivability index system of national defense engineering power system grid

3.1 抗毁性

抗毁性指标主要反映网架在持续保障重要负荷用电需求时对攻击的抵抗能力,可由综合网络结构系数指标、防护等级系数指标和空间距离系数指标进行量化。

1) 综合网络结构系数 α_c

综合网络结构系数主要从拓扑结构角度描述网架围绕负荷和电源的分布情况。

网络中心势是网络图的重要指标,可以在很大程度上反映网络系统的整体向心程度。在电力网络系统中,网络中心势刻画电力网络的集中程度,网络中心势的值越大,从电力网络整体来看,该网络倾向于围绕某一节点的集中程度越大,所围绕的节点也就越重要,该节点一旦被摧毁,对整体网络影响越大,其表达式为:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{\max[\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)]} \quad (1)$$

其中: C 为编号为 i 的节点的度数, C_{\max} 为图中度数最大的节点的度数值。

由于国防工程电力系统网架中负荷和电源的分布具有明显的特点,一般分布于网架边缘,如图3所示。

当对网络中心势进行改进后,可以用其反映网络结构围绕指定点分布的情况。当指定点为国防工程电力系统网架中的负荷节点时,就可利用改进后的网络中心势,反映国防工程电力系统网架结构围绕负荷节点的度。当分别采用改进后的网络中心势计算网架围绕电源和负荷的分布情况后,就可以得到综合网络结构系数,其表达式为:

$$\begin{cases} \alpha_c = \omega_S C_s' + \omega_W C_w' \\ C' = \frac{\sum_{i=1}^{N_D} (\bar{C} - C_i) + N_D \cdot (C_{\max} - C_{\min})}{\max[\sum_{i=1}^{N_D} (C_{\max} - C_i)]} \end{cases} \quad (2)$$

其中, C_s' 为归一化后围绕负荷的网络结构系数, C_w' 为归一化后围绕电源的网络结构系数; \bar{C} 为图中指定节点的度数均值, C_i 为编号为 i 的节点的度数, C_{\max} 为图中度数最大的节点的度数值, C_{\min} 为图中度数最小的节点的度数值; N_D 为节点的数量; ω_S 和 ω_W 为权重系数,且 $\omega_S + \omega_W = 1$,由电源和负荷的相对重要度决定。

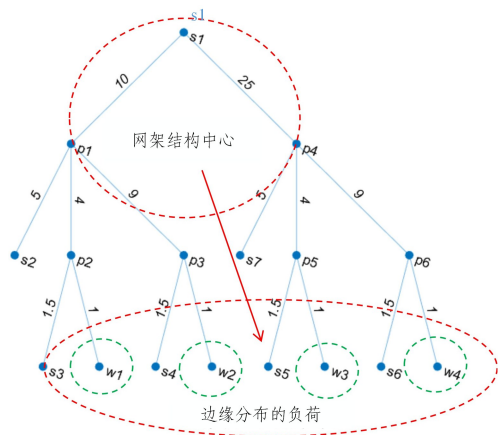


图3 负荷分布倾向示意图

Fig.3 Schematic diagram of load distribution trend

2) 防护等级系数 α_D

防护等级系数主要反映不同防护等级设施的抵抗攻击能力。将各种不同攻击转化为不同数量的普通攻击进行量化,如表2所列,其表达式为:

$$\alpha_D = \frac{\sum_{j=1}^{N_L} D_j}{N_L \cdot \max D} \quad (3)$$

其中, D_j 为编号 j 的线路的防护设施量化可抵抗普通攻击的次数; $\max D$ 为可用可抵御普通攻击数量量化后的线路防护等级的最大值; N_L 为线路的数量。可见 D 越大国防工程电力系统网架的防护能力越强,防护系数越大。

表2 防护等级和措施量化

Table 2 Quantification of protection levels and measures

防护等级	标准	防护措施	最高可抵御普通攻击的数量/次
4-5	可抵御高烈度的持续攻击	有完备的防护措施	15~25
3	可抵御高烈度的攻击	有较为完备的防护设施	5
2	可抵御中烈度的攻击	有简易的防护措施	3
1	可抵御低烈度的攻击	无防护措施 (地理敷设)	1
0	被攻击即失效	无防护措施 (完全裸露)	0

3) 空间距离系数 α_K

空间距离系数反映网架中节点或线路所占用的实际空间距离,在计算节点时采用实际占用面积进行计算,计算线路时采用实际占用长度进行计算,以计算线路时为例,其表达式为:

$$\alpha_K = \frac{\min \sum_{i=1}^{N_L - N_{LF}} S_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_L - N_{LF}} S_{ki}} \quad (4)$$

其中, S_{ki} 为编号 i 的线路的长度; N_L 为线路的数量, N_{LF} 为被毁伤的线路数量。可知空间距离越大, 空间距离系数越小。

3.2 安全性

安全性指标主要反映网架运行产生的军事风险和电力系统风险, 可参考文献[23]中的指标, 由电源运行风险和网架连接风险进行量化。

1) 电源运行风险 β_S

主要考虑国防工程电力系统网架中的发电站运行产生的大量烟雾和热量, 所引发的电源被敌方侦查和攻击的情况, 用参与发电的电站实际发电有功功率占实际总有功功率的比率大小及运行风险系数进行衡量, 其表达式为:

$$\beta_S = \frac{\max(\sum_{i=1}^{N_S - N_{SF}} P_i) - \sum_{i=1}^{N_S - N_{SF}} P_i}{\max(\sum_{i=1}^{N_S - N_{SF}} P_i)} \cdot \omega_{\beta_S} \quad (5)$$

其中, P_i 为编号 i 的电源的实际有功功率; N_S 为电源的数量, N_{SF} 为被毁伤的电源数量; ω_{β_S} 为运行风险系数, 由实际运行风险确定。

2) 网架连接风险 β_L

网架连接风险指标反映了网架运行中连接的安全性, 主要考虑毁伤后的新网络与原网络在网架运行连接方面的变化情况, 可分别用负荷电源连接效率与线路连接效率进行描述, 其表达式为:

$$\begin{cases} \beta_L = \omega_{L1} \cdot S_1 + \omega_{L2} \cdot S_2 \\ S_1 = \frac{\sum_{j=1}^{N_S - N_{SF}} \sum_{i=1}^{N_W} JN(i, j)}{\max JN(i, j)} \\ S_2 = \frac{2(N_L - N_{LF})}{N_L \cdot (N_L - 1)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, S_1 为负荷电源连接效率, S_2 为线路连接效率, N_L 为线路的数量, N_{LF} 为被毁伤的线路数量, $JN(i, j)$ 为电源负荷连接数量。

3.3 恢复性

恢复性指标主要反映网架遭受攻击或故障后, 新网架向原始网架恢复的能力, 参考文献[24]中的指标, 可由电源备用率、线路恢复率和节点恢复率进行量化。

1) 电源备用率 γ_G

电源备用率指标反映系统恢复过程中电源对系统的支撑能力, 采用相对电源备用欲度进行量化, 网架中电源备用欲度越大, 系统恢复能力越强。其表达式为:

$$\gamma_G = \sum_{i=1}^{N_S} \left(\frac{G_i \max - G_{iF}}{G_i \max} \cdot \omega_{G_i} \right) \quad (7)$$

其中, $G_i \max$ 为编号为 i 的电源的总有功功率, G_{iF} 为编号为 i 的电源受到外部扰动后失效的有功功率, N_S 为电源的数量, ω_{G_i} 为编号为 i 的电源的权重系数, 根据电源重要性选取。

2) 线路恢复率 γ_L

线路恢复率指标反映网架恢复过程中线路的恢复情况, 采用考虑重要度的线路恢复比率进行量化, 其表达式为:

$$\gamma_L = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\frac{N_L - N_{LF}}{N_L} \cdot \omega_L \right) \quad (8)$$

其中, N_L 为线路的数量; N_{LF} 为被毁伤的线路数量; ω_L 为权重系数, 根据线路相对重要性选取。

3) 节点恢复率 γ_D

节点恢复率指标反映网架恢复过程中节点的恢复情况, 采用考虑重要度的节点恢复比率进行量化, 其表达式为:

$$\gamma_D = \sum_{i=1}^{N_D} \left(\frac{N_D - N_{DF}}{N_D} \cdot \omega_D \right) \quad (9)$$

其中, N_D 为节点的数量; N_{DF} 为被毁伤的节点数量; ω_D 为权重系数, 根据节点相对重要性选取。

3.4 指标分析

效益型指标定义为属性值越大, 网架生存性越强的指标; 成本型指标定义为属性值越小, 网架生存性越强的指标。经以上分析可知, 网络结构指标、防护等级指标、电源备用率指标、线路恢复率指标、节点恢复度指标、网架连接安全指标这6个三级指标的属性值越大, 国防工程电力系统网架的生存性越强, 为效益型指标; 空间距离指标、电源运行风险指标这2个三级指标的属性值越小, 国防工程电力系统网架的生存性越强, 为成本型指标。

4 数学模型

国防工程电力系统网架生存性评估的数学模型可表示为:

$$Surv_{v_i} = \omega_1 \alpha + \omega_2 \beta + \omega_3 \gamma \quad (10)$$

具体判断条件为:

$$\begin{cases} \alpha = \omega_{\alpha C} \alpha_C + \omega_{\alpha D} \alpha_D + \omega_{\alpha K} \alpha_K \\ \alpha_D = \omega_{\alpha DS} C_S + \omega_{\alpha DL} C_L \\ \beta = \omega_{\beta S} \cdot \beta_S + \omega_{\beta L} \cdot \beta_L \\ \gamma = \omega_{\gamma G} \cdot \gamma_G + \omega_{\gamma L} \cdot \gamma_L + \omega_{\gamma D} \cdot \gamma_D \\ \text{s. t. } \begin{cases} h_{\min} \leq h(P, Q, U, \theta) \leq h_{\max} \\ g(P, Q, U, \theta) = 0 \\ \sum_{j \in N_W} \varphi_j \geq 1, j \in N_W \\ \sum_{j \in N_W} \eta_j \geq \eta_{\min}, j \in N_W \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $Surv_{v_i}$ 为生存性指标; α 为抗毁性指标; β 为安全性指标; γ 为恢复性指标。 $g(P, Q, U, \theta) = 0$ 为电力系统运行潮流约束等式方程, $h_{\min} \leq h(P, Q, U, \theta) \leq h_{\max}$ 为电力系统运行参数约束不等式, $\varphi_j \geq 1$ 表示系统满足负荷运行的连通性约束, $\eta_j \geq \eta_{\min}$ 表示系统满足负荷运行功率约束, N_W 为负荷节点的数量。

5 考虑攻击策略的仿真设计

某国防工程为指挥防护工程, 其网架的保障任务为保障电力从电源节点向负荷节点的持续充足供应, 其网架结构如图1所示。任务中止有两种方式: 一是保障任务完成; 二是网架结构故障损毁中止, 即4个重要负荷不能持续获取所需的电力供应而中止。其系统状态退化路径受多种因素影响, 表现较为不明显, 需要进行仿真。

5.1 攻击策略

现代战争中, 国防工程电力系统网架面临的攻击随敌方对我方信息掌握程度变化而变化, 一般可分为随机攻击和蓄意攻击:

1) 当敌方对我方的网架信息的掌握不够精确时, 倾向于采取随机攻击的方式, 结合国防工程电力系统网架结构不同的防护能力和随机攻击效果, 可区分为随机线路攻击策略和随机节点攻击策略。

2) 当敌方对我方的网架信息的掌握较为精确时, 倾向于采取有针对性的蓄意攻击, 此时结合国防工程电站运行风险

和网架结构的特点,可区分电源节点攻击策略和节点度数攻击策略。

以上 4 种攻击策略的具体情况如下:

1) 随机线路攻击(RL 模式):每次随机攻击 1 条线路,每次普通攻击造成线路抵御普通攻击次数减少 1 次,并逐渐增加攻击次数至该线路损毁移除,后依次攻击其余线路,至系统无法运行,取各攻击波次 10 次仿真结果的平均值。

2) 随机节点攻击(RN 模式):每次随机攻击 1 个节点,每次普通攻击造成节点抵御普通攻击次数减少 1 次,并逐渐增加攻击次数至节点损毁移除,后依次攻击其余节点,至系统无法运行,取各攻击波次 10 次仿真结果的平均值。

3) 节点度数攻击(D 模式):每次攻击节点度数最大的节点,每次普通攻击造成节点抵御普通攻击次数减少 1 次,并逐渐增加被攻击次数至该节点被移除,后继续攻击节点度数最大的节点,至系统无法运行,取各攻击波次 10 次仿真结果的平均值。

4) 电源节点攻击(S 模式):每次选择攻击 1 个电源节点,每次普通攻击造成电源节点抵御普通攻击次数减少 1 次,并逐渐增加攻击次数至该电源节点被移除,后依次攻击其余电源节点,至系统无法运行,取各攻击波次 10 次仿真结果的平均值。

5.2 仿真流程

在某国防工程电力系统网架生存性仿真中,做如下设定:

1) 网架在遭受攻击中断后,剩余线路和节点若满足运行条件可重新组网运行,且线路故障不越级造成影响。

2) 多波次攻击仿真中,由于国防工程电力系统保障任务的持续时间和相对修复时间都较短,故障模式均可视为不可修复模式。

3) 当防护设施抵御普通攻击的数量降低为 0 时视为防护等级为 0 的无防护设施,可继续运行;防护等级为 0 的设施,当再次遭受打击时,线路或节点将立即中断。

4) 直接连通两个节点对,且敷设路径相同的线路,在建模时视为电流可双向流动的同一条线路。

考虑攻击策略的国防工程电力系统网架生存性仿真实验的流程如图 4 所示。

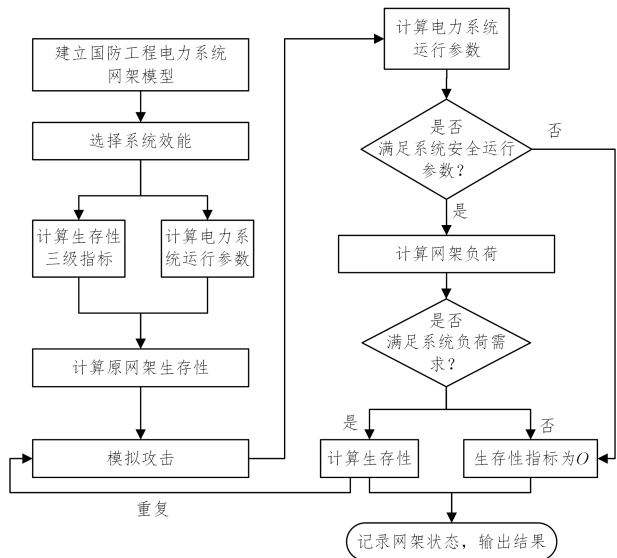


图 4 仿真流程

Fig. 4 Simulation process

6 算例

图 1 所示的某国防工程电力系统网架节点详细参数如表 3 所列,其线路详细参数如表 4 所列。对图 3 所示的某国防工程电力系统网架进行生存性评估,根据相关经验, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别取 0.3, 0.5, 0.2, 其生存性评估结果如表 5 所列。

表 3 某国防工程电力系统网架节点参数

Table 3 Grid node parameters of a specific national defense engineering power system

名称	类别	电压等级/kV	功率/kW	防护等级
S1	电源节点	10	1200	2
S2	电源节点	10	1200	2
S3	电源节点	10	1200	2
S4	电源节点	10	1200	2
S5	电源节点	10	1600	2
S6	电源节点	10	1600	2
S7	电源节点	35	3000	2
P1	中间节点	10	2000	3
P2	中间节点	10	2000	3
P3	中间节点	10	2000	3
P4	中间节点	10	2000	3
P5	中间节点	35	3000	3
P6	中间节点	35	3000	3
P7	中间节点	35	4000	3

名称	类别	电压等级/kV	最低需求功率/kW	最高需求功率/kW	防护等级
W1	负荷节点	10	400	800	5
W2	负荷节点	10	400	800	5
W3	负荷节点	10	400	800	5
W4	负荷节点	10	400	800	5

表 4 某国防工程电力系统网架线路参数

Table 4 Grid line parameters of a specific national defense engineering power system

名称	类型	电压等级/kV	长度/km	防护等级
P6-P7	线路	35	25.0	0
P5-P7	线路	35	10.0	0
S7-P7	线路	35	23.0	0
P1-P5	线路	10	4.0	1
P2-P5	线路	10	9.0	1
P3-P6	线路	10	3.0	1
P4-P6	线路	10	7.0	1
S5-P5	线路	10	6.0	1
S6-P6	线路	10	5.0	1
W1-P1	线路	10	1.5	2
P2-W2	线路	10	1.0	2
P3-W3	线路	10	1.5	2
P4-W4	线路	10	1.0	2
S1-P1	线路	10	1.5	2
S2-P2	线路	10	1.5	2
S3-P3	线路	10	1.5	2
S4-P4	线路	10	1.5	2

在上述 4 种攻击模式下,采用 Python 进行编程仿真分析,得到某国防工程电力系统网架生存性指标最大的 4 个状态和生存指标最小的 4 个状态,如表 6 所列;其生存性随网架结构的变化情况和生存性与各二级指标变化关系如图 5 所示;其生存性与承受等效攻击次数及变化趋势如图 6 所示。可见,生存性最优为原始网架,生存性最差为电源 S1, S2, S3, S4, S5, S6 遭受毁伤后的网架。

表 5 原网架生存性评估结果

Table 5 Survivability evaluation results of the original grid

一级指标	生存性							
	0.7362							
二级指标	抗毁性		安全性			恢复性		
	0.6208		0.7000			1.0000		
三级指标	综合网络结构	防护等级	空间距离	电源运行风险	网架连接风险	电源备用率	线路恢复率	节点恢复率
	0.5138	0.5332	1.0000	0.4000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

表 6 生存性评估结果(部分)

Table 6 Survivability evaluation results(partial)

类型	网架	数量	生存性
节点	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	18	
线路	S1-P1, W1-P1, S2-P2, P2-W2, S3-P3, P3-W3, S4-P4, P4-W4, S5-P5, S6-P6, S7-P7, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	17	0.7362
节点	S1, S2, S3, S4, S5, S6, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	17	
线路	S1-P1, W1-P1, S2-P2, P2-W2, S3-P3, P3-W3, S4-P4, P4-W4, S5-P5, S6-P6, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	16	0.6800
节点	S1, S2, S3, S4, S5, S7, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	17	
线路	S1-P1, W1-P1, S2-P2, P2-W2, S3-P3, P3-W3, S4-P4, P4-W4, S5-P5, S7-P7, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	16	0.6789
节点	S1, S3, S4, S5, S6, S7, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	17	
线路	S1-P1, W1-P1, P2-W2, S3-P3, P3-W3, S4-P4, P4-W4, S5-P5, S6-P6, S7-P7, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	16	0.6572
节点	S6, S5, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6	12	
线路	W1-P1, P2-W2, P3-W3, P4-W4, S6-P6, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-S5	10	0.2743
节点	S6, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	12	
线路	W1-P1, P2-W2, P3-W3, P4-W4, S6-P6, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	11	0.2430
节点	S5, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	12	
线路	W1-P1, P2-W2, P3-W3, P4-W4, S5-P5, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	11	0.2428
节点	S7, W1, W2, W3, W4, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	12	
线路	W1-P1, P2-W2, P3-W3, P4-W4, S7-P7, P1-P5, P2-P5, P3-P6, P4-P6, P5-P7, P6-P7	11	0.2376

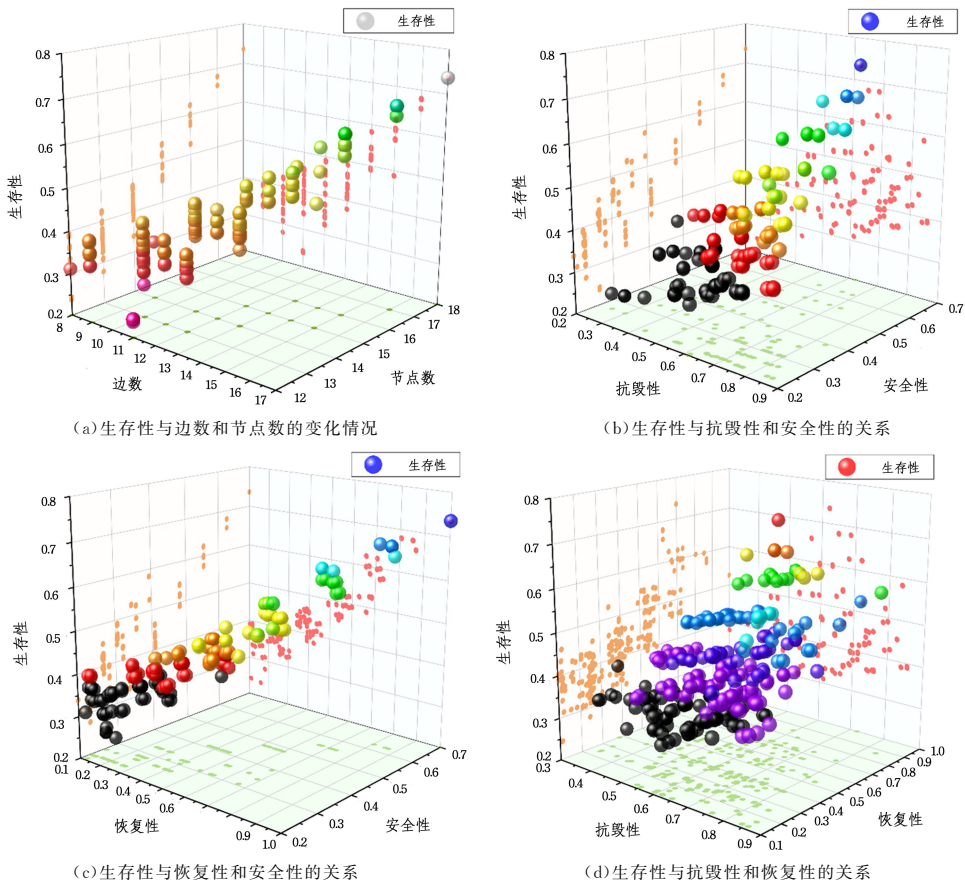


图 5 生存性变化趋势及与抗毁性、安全性、恢复性的关系

Fig. 5 Change trend of survivability and its relationship with invulnerability, security and recoverability

结合图 6 的仿真结果,可以进行如下分析:

1) S 模式下,国防工程电力系统网架生存性降低速度相

对较慢,对攻击表现出较强的抵抗性,这与实际认识有一定的出入。主要原因在于,单个电源对单个负荷较为重要,但国防

工程电力系统网架电源数量相对较多,电源节点数量占总节点数量的38.9%,电力系统组网后对单个电源的依赖程度降低,极端情况下部分单一电源可以满足全部负荷运行,系统组网运行后生存性有一定的提升。

2)RN模式下,国防工程电力系统网架生存性降低速度较为缓慢,主要原因在于国防工程电力系统网架节点的防护能力都较强,多次攻击节点时,网架的生存性表现较好,这与实际认知一致。

3)D模式下,仅15轮攻击就使得网架停运,其中P5节点损毁导致系统生存性下降28.4%,P6损毁导致系统生存性继续下降28.3%,可见,结构中度数最大的P5与P6节点为网架的关键节点。

4)RL模式下,线路生存性指标降低速度较快,其中前3波次攻击生存降低了30%,这是由于网架中存在3条无防护的线路,导致针对线路进行攻击时,这些线路较快损毁,并影响了系统的生存性。

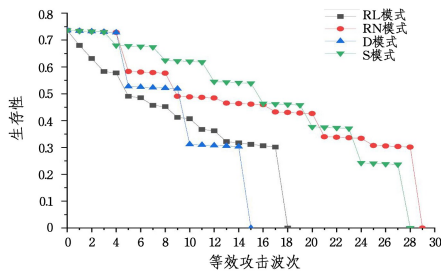


图6 4种攻击策略下生存性变化趋势

Fig. 6 Change trend of survivability with four attack strategies

通过以上分析,可以得出以下结论:

1)不同攻击策略效果不同,总体上看,随机攻击下,系统生存性下降较为缓慢,符合无标度网络特点,而蓄意攻击策略不一定更有效。

2)针对度数最大的节点攻击策略毁伤效果最直接,其原因在于,敌方精确掌握了我国的网架结构信息,度数最大节点毁伤使网架连通效率大幅度下降,导致生存性大幅度下降。对实际工作的指导意义在于,应重点加强国防工程网架结构的信息保密,综合考虑改进网架结构,并提升度数较大节点的防护能力。

3)网架的防护等级对生存性有较大影响,当网架生存性大幅度降低时,都表明网架结构中的节点或者线路被毁伤,即节点或线路的防护被攻击破坏,而生存性降低较为缓慢的过程,都表现出防护设施对攻击的抵抗和吸收,且在随机攻击中,由于线路的防护等级较小,因此被摧毁得更快。对实际工作的指导意义在于,应改造现有防护等级较低的线路,并在规划建设新线路时优先考虑建设防护等级较高的线路。

通过仿真分析可以得出,本文所提的多指标网架生存性定量评估方法能够有效区分各种攻击策略的影响,所得到的生存性定量评估指标可以清晰反映出网架的生存性特征,验证了该方法的有效性,且多种攻击策略下的生存性指标变化情况,能够反映出网架生存性的薄弱环节。

结束语 生存性评估是生存性研究中的重要组成部分,本文结合国防工程电力系统网架的特点,提出了适用于国防工程电力系统网架生存性评估的指标体系,分别从抗毁性、安

全性和恢复性3个维度对国防工程电力系统网架生存性进行评估,并通过丰富的攻击策略,在生存性评估的基础上对某国防工程电力系统网架进行仿真分析,提高了仿真测试的准确性,结果更有说服力。下一步将以生存性评估为基础,开展生存性国防工程电力系统网架优化设计,为提升国防工程作战能力提供科学指导。

参考文献

- [1] HEEGAARD P E, TRIVERDI K S. Network Survivability modeling[J]. Computer Networks, 2009(1):1215-1234.
- [2] MARK W, KOOSHA M, SAHRA S S, et al. Survivability Evaluation and Importance Analysis For Cyber-Physical Smart Grids[J]. Reliability Engineering Amp; System security, 2021, 210:107479.
- [3] KONSTANTINOU C. Toward a Secure and Resilient All-Renewable Energy Grid for Smart Cities[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2022, 11(1):33-41.
- [4] TOMAS L, RODRIGO M, ALEJANDRO N E, et al. Identifying Optimal Portfolios of Resilient Network Investments Against Natural Hazards, With Applications to Earthquakes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2):1411-1421.
- [5] WANG Z K, DING T, JIA W H, et al. Multi-stage stochastic programming for resilient integrated electricity and natural gas distribution systems against typhoon natural disaster attacks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 111784.
- [6] WU X N, LIAO B R, SU Y G, et al. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144:108529.
- [7] BAI X W, LIU D W, TAN J, et al. Dynamic Identification of Critical Nodes and Regions in Power Grid Based on Spatio-Temporal Attribute Fusion of Voltage Trajectory[J]. Energies, 2019, 12(5):780.
- [8] TAMIRU D, JIWANJOT S, VIJAY K. Sood. Evaluation of a grid-connected reduced-component boost multilevel inverter (BMLI) topology[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(6):2075-2107.
- [9] NABIL M, TAMAS K, MIHAI C. Communication-Free Equivalent Grid Impedance Estimation Technique for Multi-Inverter Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2):1542-1552.
- [10] NASSER N, FAZELI M. Buffered-Microgrid Structure for Future Power Networks; a Seamless Microgrid Control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1):131-140.
- [11] XU Z P, JOSE E R, LIU Y, et al. A new resilience-based component importance measure for multi-state networks[J]. Reliability Engineering & System security, 2020, 193:106591.
- [12] BAI Y S, LI SH Y, GU X P, et al. Collaborative planning of resilient backbone grids and PMU placement for power systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131:107106.
- [13] CHENG M, YAN X M, ZHOU J W. Negative-Sequence Current Compensation-Based Coordinated Control Strategy for Dual-

- Cage-Rotor Brushless Doubly Fed Induction Generator Under Unbalanced Grid Conditions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 4762-4773.
- [14] ARIEF N P, SIGITP S, LEONARDO G, et al. Countermeasures design and analysis for occupant survivability of an armored vehicle subjected to blast load[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(5): 1893-1899.
- [15] YANG L, CHEN Y, QIU Q G, et al. Risk Control of Mission-Critical Systems: Abort Decision-Makings Integrating Health and Age Conditions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(10): 6887-6894.
- [16] ZHAO X, CHAI X F, SUN J L, et al. Joint Optimization of Mission Abort And Component Switching Policies For Multistate Warm Standby Systems[J]. *Reliability Engineering & System security*, 2021, 212: 107641.
- [17] HE Y T. On the generalized Survivability of Aircraft and its Evaluation Method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 185-193.
- [18] JAIN N K, YADAV D S, VERMA A. Neuro-Fuzzy and Fuzzy Schemes For Cooperative Communication In Wireless Sensor Network: A Military Battlefield Scenario[J]. *IET Communications*, 2020, 14(21): 3761-3770.
- [19] SHI Q, DING Y H, QING L, et al. Survivability Assessment for Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Central North University(Natural Science Edition)*, 2020, 41(5): 418-430, 436.
- [20] CEN H F, YANG X Y, WANG Y T, et al. A planning method for secure power networks with microgrids based on survivability evaluation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 109-117.
- [21] DONG F F, LIU D CH, WU J, et al. Constructing core backbone network based on survivability of power grid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 67: 161-167.
- [22] LOU Y Y, CHEN C M, LIU X M, et al. Multi-Objective Planning Method for Backbone Grid Considering Economy and Multi-Stage Anti-Disaster Performance [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(3): 32-39.
- [23] ABOLFAZL R, JORDAN P, RIBAL A, et al. A resilience-based recovery scheme for smart grid restoration following cyberattacks to substations[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 145: 108610.
- [24] GIAP L, SIFAT F, ANDREA M, et al. Survivable virtual network mapping with content connectivity against multiple link failures in optical metro networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(11): 301-311.



LI Fei, born in 1989, master, engineer. His main research interest is the survivability evaluation and optimization of power system grids in national defense engineering.