

基于复杂网络理论的大规模电网连锁故障研究

文/顾慧子
国网上海市电力公司物资公司

为深入研究大规模电网的连锁故障机理，构建基于复杂网络理论的电网模型。分析电网连锁故障的物理机理、影响因素；计算电网的拓扑指数，评估系统脆弱性；设置初始故障，开展连锁故障仿真。结果表明，严重事故快速蔓延，导致系统频率电压异常，大面积停电。这证实电网的高复杂性与脆弱性，有效的防控对策迫在眉睫。

我国电网规模快速扩大，至2025年发电装机容量预计达到30亿kW。与此同时，电网结构日益复杂，不同电压等级的电网相互融合，新能源并网规模不断攀升，电力系统稳定性和抗扰动能力面临前所未有的挑战。电网系统作为一个包含上万个节点和连接的超大规模复杂网络，节点和线路间存在着错综复杂的非线性关系。一旦某个环节发生故障，极易激发系统内部连锁反应，并迅速失控蔓延为全系统的停电事故。如何从系统层面提高电网的抗扰动能力，有效防范和遏制大规模连锁故障的发生与扩散，是电力系统安全稳定运行面临的关键问题。

电网连锁故障发生机理

1. 物理机理

电网连锁故障的物理机理主要与电网中的发电机组、负载以及电力设备的物理行为有关。当电网中的某一部件或线路发生故障时，会导致该部件或线路隔离，改变整个电网的功率平衡状态，引起电网中的频率和电压的波动，继而触发电网保护装置的动作。如果保护动作不协调，会导致更多电网部件或线路断开，进一步恶化电网状态，最终演变为全系统大面积停电。具体来说，发电机组在失去

同步后，其转速和功角会发生较大变化，使得机组功率输出急剧下降，减小电网对负载的供电能力。由于电网参数和结构的改变，部分负载区域的电压会迅速升高或降低，触发负载的保护装置，使更多负载脱落。在这种电压和频率双重变化的叠加作用下，电网保护系统会重新划分电网的拓扑结构，并将更多区域隔离，最终导致电网分裂为多个无功连接的孤岛。如图1所示。

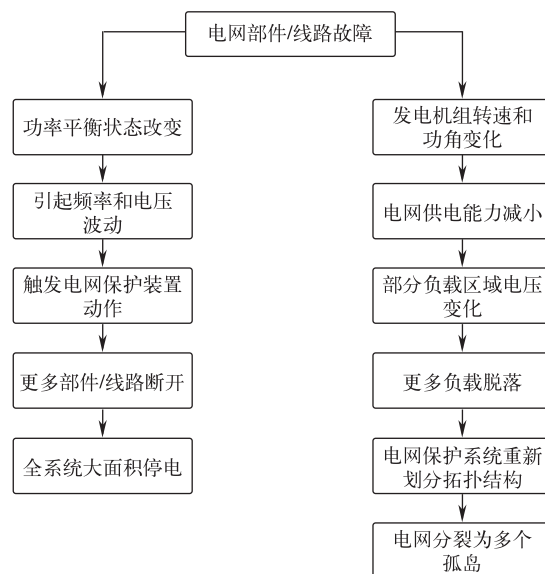


图1 电网连锁故障机理图

2. 影响因素分析

电网连锁故障的影响因素主要包括电网的拓扑结构、发电机组的参数、负载分布情况以及保护系统的设置等。从拓扑结构来看,节点分布不均匀、缺乏联络通道以及局部过于紧密连接等结构特征会增加电网的脆弱性,使电网更易发生连锁故障。发电机组参数中,机组容量越大和接入电网的比例越高,其发生故障后对系统影响也越大。负载分布情况决定输电网络的电流分布,从而影响保护装置的负载能力。保护系统的选择与设置也会直接影响故障的隔离速度和范围。比如过于保守的保护会造成不必要的断开,而保护范围过大也会加速故障的蔓延。

复杂网络理论下大规模电网连锁故障分析

1. 电网复杂网络模型构建

(1) 节点定义

节点定义涉及到电力系统中的各个关键元素的抽象表示。在这个过程中,将电网系统中的发电机、变压器、输电线路和负荷等各种元素视为网络中的节点。式(1)表示一个节点的属性,即

$$N_i = (ID_i, P_i, Q_i, V_i, \theta_i) \quad (1)$$

式中, N_i 为第*i*个节点; ID_i 为节点的唯一标识符; P_i 和 Q_i 分别为节点的有功功率和无功功率; V_i 为节点的电压幅值; θ_i 为节点的相角。

这些属性的准确描述对于电网的连锁故障分析至关重要。节点定义的精确性和完整性对于电网连锁故障模型的构建和分析具有重要意义。通过准确描述每个节点的属性,更好地理解电网系统的拓扑结构和电气特性,有助于识别潜在的脆弱节点和故障传播路径,从而提高电网系统的鲁棒性。节点定义还为后续的电网状态估计、故障定位和防控策略的制定提供基础。

(2) 耦合关系设置

在电力系统中,节点之间的耦合关系通过导纳矩阵(Y 矩阵)来表示,其定义为

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \quad (2)$$

式中, Y_{ij} 为节点*i*和节点*j*之间的导纳; Z_{ij} 为节点*i*和节点*j*之间的阻抗。

导纳矩阵是电力系统的核心组成部分,描述电

力网络中各个节点之间的电流和电压之间的关系。

节点*i*和节点*j*之间的有功功率和无功功率的关系表示为

$$P_{ij} = V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (4)$$

式中, P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点*i*和节点*j*之间的有功功率和无功功率传输; V_i 和 V_j 分别为节点*i*和节点*j*的电压幅值; Y_{ij} 为节点*i*和节点*j*之间的导纳模值; θ_i 和 θ_j 分别为节点*i*和节点*j*的相角。

公式的精确性和耦合关系设置的准确性对于电网连锁故障分析的成功非常重要。通过准确描述节点之间的耦合关系,更好地理解电力系统中的能量传输和故障传播,有助于识别潜在的故障扩散路径和脆弱性节点,为电网的稳定性和可靠性提供更全面的支持。在实际电力系统中,耦合关系的设置需要考虑到复杂的网络拓扑、线路参数和设备特性。

2. 电网脆弱性分析

(1) 拓扑指数计算

拓扑指数是用于衡量电力系统拓扑结构和节点之间关联的一组关键参数,其中一个经典的拓扑指数是节点度数。节点度数 K_i 是一个节点与其他节点相连的数量,计算公式为

$$K_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (5)$$

式中, A_{ij} 为邻接矩阵中的元素,表示节点 N_i 与节点 N_j 之间是否相连。

通过度数,评估节点在电网拓扑中的重要性和连接性,度数较高的节点通常具有更多的连接,故障对整个系统产生更大的影响。

介数中心性(Betweenness Centrality)是衡量一个节点在电网中作为中介点的潜力。具体而言,介数中心性 C_b 计算公式为

$$C_b(i) = \sum_{j \neq i \neq k} \frac{\sigma(j, k/i)}{\sigma(j, k)} \quad (6)$$

式中, $\sigma(j, k)$ 为节点*j*和节点*k*之间的最短路径数量; $\sigma(j, k/i)$ 为节点*i*位于节点*j*和节点*k*之间最短路径上的数量。

介数中心性的高低反映节点在电网中的关键性,特别是在故障传播中的作用。电网脆弱性分析不仅仅关注单一指标,还包括多个拓扑指数的综合评估,以绘制电力系统的拓扑特征图。拓扑指数的

计算和分析有助于识别潜在的脆弱节点和路径，为电网的安全性和可靠性提供重要的参考依据。

(2) 脆弱性评估

脆弱性评估的一个重要指标是电力系统的节点脆弱性指数 (Node Vulnerability Index)，计算公式为

$$NVI_i = \frac{\Delta P_i}{P_{\text{total}}} \quad (7)$$

式中， NVI_i 为节点 i 的脆弱性指数； ΔP_i 为节点 i 的功率损失； P_{total} 为整个电网的总有功功率。

脆弱性指数反映节点在电网连锁故障情况下的脆弱性程度，数值越高表示节点越容易受到故障的影响。网络脆弱性评估还考虑其他关键指标，如传播速度指标 (Propagation Speed Index) 和脆弱路径指标 (Vulnerability Path Index)。传播速度指标用于衡量故障在电网中传播的速度，计算公式为

$$PSI = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta P_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (8)$$

式中， ΔP_i 为节点 i 的功率损失； Δt_i 为节点 i 失效的时间。

脆弱路径指标则用于识别电网中的关键路径，帮助制定故障应对策略。脆弱性评估不仅仅是理论分析，还需要结合具体的电力系统数据和操作情况。通过分析不同条件下的脆弱性指标，为电力系统的运行管理和故障应对提供关键信息。系统性的脆弱性评估有助于电力系统的稳定性和可靠性的提高，确保电力供应的连续性和安全性，特别是在面临复杂连锁故障情境时。

3. 电网连锁故障模拟

(1) 初始故障设置

初始故障是各种类型的，包括短路故障、设备失效和线路断开等。初始故障的类型和位置需要根据实际情况进行选择，以确保模拟能够反映真实故障场景。初始故障的影响为

$$V_{\text{final}} = V_{\text{initial}} - IZ \quad (9)$$

式中， V_{final} 为故障后的节点电压； V_{initial} 为故障前的节点电压； I 为故障电流； Z 为节点的阻抗。

通过式 (9)，计算出故障后的电压值，评估故障的影响。初始故障设置还需要考虑电网的拓扑结构、设备参数和操作条件等多个因素。在模拟中，需要考虑节点之间的连接关系，设备的额定参数，

负荷水平等。数据的准确性对于模拟结果的可靠性具有重要影响。

(2) 关键因素分析

一个关键因素是电力系统的负荷水平。负荷水平通过实际用电数据表示，数据通常以每个节点的功率需求表示。用 P_i 表示节点 i 的有功功率需求， Q_i 表示节点 i 的无功功率需求。考虑到电力系统的负荷分布对联锁故障传播有显著影响，计算节点 i 的负荷水平指标

$$\text{负荷水平}_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \quad (10)$$

其结果将有助于确定电力系统中哪些节点对联锁故障传播具有较大的影响。

另一个关键因素是电力系统中的拓扑结构。电力系统的节点和线路之间的连接关系通过邻接矩阵 A_{ij} 表示，其中 $A_{ij}=1$ 表示节点 i 和节点 j 之间相连， $A_{ij}=0$ 表示不相连。通过分析拓扑结构，识别出一些节点在电网中的关键地位，从而影响着故障传播的速度和范围。

还有一些其他关键因素，如阻抗参数、设备容量和传输线路的长度等，都对电网连锁故障传播产生重要影响。通过综合分析这些因素，能够更全面地理解电力系统的脆弱性，为制定故障应对策略提供有力的依据。

仿真验证

1. 仿真环境搭建

搭建的仿真验证环境基于Windows Server 2012的64位操作系统，采用MATLAB R2019a版本。硬件配置为双Xeon E5-2620v4 2.1 GHz六核心CPU，256 GB内存，支持多进程并行计算。电力系统组件库共涉及34种不同类型的电气设备模型，包括汽轮发电机、水机组、风电机组、光伏发电、各类负荷以及其他常见的电网设备，参数数据均参照某省区域大型电网的实际数据确定。发电机组模型的参数包括额定容量、转动惯量、阻尼系数和励磁时常，取典型值分别为100 MW、5 s、0.6、0.3 s。负荷模型根据年最大、最小负荷数据拟合得出，选用动态指数模型。仿真算例包含500个节点，134台发电机组，总装机容量为5 860万kW。线路最长达260 km，最小电气距离为15 km。变电站66座，最大供电能力7 000万kV·A。额定电压为500 kV。多

种增强电网可靠性的措施已应用在该系统中。通过丰富的组件库和高度拟合的系统参数，仿真环境能够充分反映大规模电网在复杂条件下的瞬态演化过程，为电网连锁故障机理分析奠定坚实的基础。

2. 仿真结果分析

仿真结果见表1。当发生 DX1 500 kV变电站主变压器事故后，电网频率在最初10 s内迅速从标称值50 Hz下降到49.2 Hz，接着在20 s内进一步下降到48.7 Hz，触发主站和发电机组的低频率装置。同时，电压异常在电网中迅速蔓延，最远抵达距离事故点300 km外的一个变电站，其电压降至0.83倍。仿真结果表明，本次事故导致电网损失发电容量1 260万kW，损失负载容量950万kW，网络过渡稳定指数（TSI）最低达到0.78，低于警戒值0.8。根据仿真记录，事故整个过程中，共有45台发电机组和37个负载节点发生脱落。特别需要注意的是，位于事故点附近的两个发电厂中，有6台机组由于事故的严重影响进入失速状态。事故区域相邻的两个500 kV节点由于电压和频率异常，其过/欠电压、欠频保护相继动作，与系统断开，事故影响范围不断扩大，最终导致整个系统出现大面积停电。

表1 仿真结果分析

指标	事故前	事故后10 s	事故后20 s	事故后30 s
系统频率/Hz	50	49.2	48.7	48.9
电压合格率/%	100	87.3	83.1	81.2
发电损失/万kW	0	820	1260	1350
负载损失/万kW	0	560	950	1100
过渡稳定指数	1.0	0.83	0.78	0.76
失速机组数	0	2	6	8
脱落线路数	0	3	8	15

结束语

本研究基于复杂网络理论，构建大规模电网的数学模型，深入分析电网连锁故障的机理、影响因素和脆弱性，并通过仿真验证理论分析的正确性。研究显示，电网系统具有复杂网络的典型特征，节点和连接之间相互依赖、故障易于扩散蔓延。当发生局部大扰动时，会迅速演变为全系统的大面积故障。仿真结果表明，严重事故在短时间内使系统频率下降超过1 Hz，电压合格率下降20%以上，大量发电机组和负载断开，网络稳定性指标下降至警戒

线以下，充分证实电网的高度复杂性和脆弱性。EA

(收稿日期：2024-03-14)

参考文献

[1] 杨振宁. 基于复杂网络理论的电网连锁故障分析评估[D]. 徐州：中国矿业大学，2022.

[2] 龙奕蓉. 基于复杂网络理论的电力研究概论[J]. 科技风，2020，(19)：158.

[3] 李昌超. 基于复杂网络理论的电力系统安全分析与控制[D]. 青岛：中国石油大学，2020.

[5] 高菁. 基于复杂网络理论的电网拓扑结构建模和连锁故障研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2018.

[7] 毕振. 基于复杂网络理论的电网自组织临界规律演化分析[D]. 北京：中国电力科学研究院，2018.

[8] 龚思丞，黄文焘，邵能灵，等. 基于复杂网络的电热微网拓扑综合评估方法[J]. 电力系统自动化，2019，43 (23)：173-184.

[9] 冀星沛，王波，刘涤尘，等. 相依网络理论及其在电力信息-物理系统结构脆弱性分析中的应用综述[J]. 中国电机工程学报，2016，36 (17)：4521-4533.

[10] 孙明蔚，童晓阳，刘新宇，等. 基于时序贝叶斯知识库的电网故障诊断软件原型系统设计[J]. 电力系统自动化，2014，38 (21)：77-83.

[11] 谭玉东，李欣然，蔡晔，等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报，2014，34 (1)：146-152.

[12] 夏可青，陈根军，李力，等. 基于多数据源融合的实时电网故障分析及实现[J]. 电力系统自动化，2013，37 (24)：81-88.

[13] 罗钢，陈金富，石东源，等. 基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J]. 中国电机工程学报，2013，33 (25)：147-155+22.

[14] 范文礼，刘志刚. 基于复杂网络的电网连锁故障模型研究综述[J]. 电力系统自动化，2012，36 (16)：124-131.

[15] 陈春，王业平，崔毅敏，等. 电网故障信息系统中的故障分析与判断[J]. 电力系统自动化，2011，35 (19)：97-100.