

考虑电网承载结构的连锁故障模拟与防御策略

刁 塑¹, 刘俊勇¹, 刘友波¹, 刘挺坚¹, 丁理杰², BAZARGAN Masoud³

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 阿尔斯通电网研究与技术中心, 英国 斯塔福德 ST17 4LX)

摘要: 提出基于复杂网络和熵理论的电网承载结构模型, 定义线路承载能力、承载系数及全网电气结构承载熵等指标, 研究其与电网自组织临界性的定性关系。通过 IEEE 118 节点算例仿真揭示了承载结构能够实时反映电网结构与运行状态的变化情况, 承载熵变化与负荷损失变化之间具有宏观关联性。在此基础上, 提出同时在故障过程中优化控制和电网发展过程中规划建设的双层连锁故障防御策略, 并建立加入防御策略的连锁故障仿真模型。采用某省实际电网进行连锁故障仿真, 验证了所提指标的合理性, 并通过对比加入防御策略前后大停电累积概率分布曲线验证了防御策略的有效性。

关键词: 复杂网络; 连锁故障; 承载熵; 自组织临界性; 防御

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.022

0 引言

近年来, 电网规模日益扩大, 监视控制手段不断加强, 但在世界范围内仍出现了十余起大规模停电事故, 给所在国家造成了重大损失, 人们在事后也对其进行了反思与总结^[1-3]。相关研究^[4-12]通过结合复杂网络、自组织临界性等新兴系统科学理论, 对大规模电网进行电气拓扑分析与连锁故障模拟, 探究使电网发生大停电事故或趋于自组织临界态的重要因素。在连锁故障扩散与传播时, 电网结构与薄弱环节的状态往往起到关键作用, 揭示当前电网结构、元件状态与连锁故障之间关系的研究有一定实际意义。

目前国内外对于关键或脆弱元件辨识与电网连锁故障模型的研究均较为丰富, 文献^[4-6]基于电网加权拓扑模型对高介数的元件进行攻击, 获取其对电网脆弱性的影响, 对后续复杂电网研究具有启发式的指导; 文献^[7-9]提出了物理意义更加明确的关键线路评价指标, 克服了复杂网络最短路径与潮流特性不符的问题; 文献^[10]提出了综合考虑概率与结构重要度的线路故障的预测指标; 熵是衡量系统混乱程度的重要物理量; 文献^[11-14]等结合电力系统自身特点, 提出潮流熵、脆性风险熵、能量熵等广义角度上的信息熵, 从不同方面研究元件脆弱性评估与系统自组织临界态辨识, 但同时考虑电网结构量和状态量随连锁故障过程变化的较少。在故障模型方面, 很多学者利用复杂系统理论来解释连锁故障引发大停电问题^[15], 提出的方法有 OPA 模型^[16]、

CASCADE 模型^[17]、隐性故障模型^[18]等。在验证上述脆弱元件辨识的方法时, 往往使用较为简单的故障模型, 如随机攻击、蓄意攻击等, 且大多强调其指标合理性, 应用性验证不足, 通常所提方法具有较好辨识效果, 但未利用辨识结果对电网调度运行、规划建设的启示进行更深入的研究。连锁故障模型一般通过调整系统参数如线路随机故障概率、隐性故障概率与过载容忍因子等观察其对电网自组织临界性的影响, 而未计及关键元件对连锁故障的影响。

在建筑学方面有针对性抗震结构的研究^[19], 本文借鉴建筑学关于结构和承载的思想, 为研究电网固有结构、元件状态及其转移能力与系统连锁故障抵御能力之间的关系, 结合复杂网络理论建立了区别于传统潮流与输电容量的线路承载量与承载能力的数学模型, 运用熵理论获取全局承载系数分布, 通过 IEEE 118 节点系统连锁故障仿真验证承载分布对电网自组织临界性的影响, 并针对其特点和影响在运行与建设 2 个技术层面提出抑制电网大停电事故的策略与方法, 通过对比加入防御策略前后的实际电网连锁故障仿真并结合某省网实际情况, 验证了本文理论的工程适用性。

1 电气结构承载模型

根据电网网架结构、线路特性、节点负载等, 提出线路承载量与承载能力的概念。与传统潮流和输电能力的区别在于, 承载模型在电网被拓扑化简的前提下, 仍能反映连锁故障过程中电网结构与线路承载状态的变化情况。为反映电网承载均匀性, 本文采用熵理论来评价电网线路承载系数分布有序程度。

1.1 网络结构拓扑建模

应用复杂网络理论研究电网特性前, 应获取其网

收稿日期: 2014-11-11; 修回日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261130472, 51207098); 四川省产业发展重大关键技术项目(2011GZ0225)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130472, 51207098) and Sichuan Province Industry Development Key Technologies Program(2011GZ0225)

络拓扑结构,本文对电网拓扑获取原则与假设如下。

a. 节点包含 2 类:发电机节点集合 N_g , 包含电网中所有的发电机组;广义负荷节点集合 N_l , 包含电网中所有变电站及负荷节点。

b. 网络中的边集合包含电网中的所有线路和变压器支路,权重为线路的电抗或变压器漏抗。

c. 合并操作,如合并双回路输电线和站内同电压等级母线节点等;不计并联电容支路。

1.2 电气结构承载能力

文献[7-8]基于电路方程提出电气介数 B_s 的概念,克服了传统加权介数模型假设潮流只沿网络最短路径流动的不足。由于发电机出力 and 负荷值对于线路自身的传输能力并无直接影响,为单纯反映线路承载能力大小与结构及自身参数的关系,定义电气结构介数 B_s 如下:

$$\begin{cases} B_s(m, n) = \sum_{i \in N_g, j \in N_l} |I_{ij}^m(m, n)| \\ I_{ij}^m(m, n) = I^i(m, n) - I^j(m, n) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I^i(m, n)$ 为在节点 i 与参考节点直接注入单位电流时,线路 (m, n) 上流过的电流。

电气结构介数表示采用满足基尔霍夫定律的全网单位电流分布值叠加来衡量线路在结构上的关键程度,其物理意义为仅考虑加权拓扑结构下,由发电节点往负荷节点传输功率时,线路所承担的输电任务,其值越大说明在“发电-负荷”节点间传输单位功率时所推功率越多。

输电线路由于电压等级和材质等原因具有不同的输电容量,同杆多回并架线路的可靠性也未计入网络拓扑结构中,为同时考虑上述因素,本文定义线路的承载能力 $W_c(m, n)$ 如下:

$$W_c(m, n) = N \frac{F_{(m, n)}^{\max}}{B_s(m, n)} \quad (2)$$

其中, $F_{(m, n)}^{\max}$ 为线路 (m, n) 的输电容量; N 为实际线路回数。

承载能力可理解为单位电气结构介数传输功率,其物理意义在于:线路输电能力与其所承担的输电任务应有所对应,即越关键的线路所需传输容量越大,若不满足这一原则,承载能力值将较小,说明该线路承担输电任务的能力较弱。式(2)中出现线路回次是由于重要输电通道通常采用双回及以上的多回线路进行电能输送,而在网络拓扑化简时,未计及多回输电线路容量的提升。

1.3 电气结构承载量

当某条线路断开后,原来传输的功率通常会发生转移,受影响最大的则是该条线路两端节点所包含的线路集合,本文基于复杂网络理论中节点与线路的负载关系^[20-21],定义线路的承载量由其两端节点功率度数所决定。

首先定义节点功率度数 k_m 如下:

$$k_m = \frac{\sum F_m}{d_m} \quad (3)$$

其中, d_m 为节点 m 的传统度数; F_m 为与节点 m 相连的线路上的有功功率。

为简单说明其物理含义,以图 1 所示 IEEE 9 节点电网为例,说明传统度数与功率度数的区别及物理意义。计算结果如表 1 所示(采用标么值计算,仅列出联络节点)。

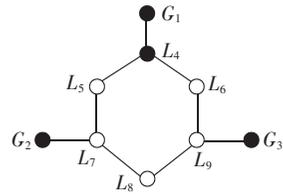


图 1 IEEE 9 节点网络拓扑示意图

Fig.1 Topology of IEEE 9-bus system

表 1 IEEE 9 节点系统传统度数与功率度数计算结果
Table 1 Calculative traditional degree and power degree for different nodes of IEEE 9-bus system

节点	传统度数	功率度数	节点	传统度数	功率度数
L_4	3	0.447	L_7	3	0.567
L_5	2	0.450	L_8	2	0.500
L_6	2	0.625	L_9	3	1.087

从表 1 可得,传统度数仅能反映节点网络拓扑信息,节点 L_4, L_7, L_9 与 L_5, L_6, L_8 这 2 组节点内部度数无差异,仅反映节点拓扑连接程度一样。节点功率度数能够表征节点有功吞吐密度,节点 L_6 的功率度数大于除 L_9 外的所有连接点,原因是其联络线少且负荷重,即在结构和状态两方面均为重载单元。功率度数较大的节点故障并退出运行,对周围线路的影响将大于其他节点。

在复杂网络理论中,边的负载一定程度上受其两端节点负载及自身权重影响^[20],本文定义线路的承载量取决于两端节点的功率度数的乘积:

$$W(m, n) = (k_m k_n)^\theta \quad (4)$$

其中, θ 为常数,本文中取 $\theta=1$ 。

文献[20]证明了在加权网络中,边的负载与其两端节点度数的乘积成线性相关,即 θ 取 1 时,是最优负载分配原则。用功率度数 k_m 替代传统节点度,可弥补纯拓扑结构下度数不能反映节点电气特性的不足。承载量是描述线路两端节点功率吞吐密度的量,若输电线路两端节点的功率度数较大,意味着该线路自身负载较重或位于大功率汇集区域,是承担电气任务较重的元件,一旦故障则会对周围线路造成较大影响和冲击。

1.4 电气结构承载阈

由上节定义可知,当系统发生连锁故障并导致

线路开断和电网结构变化时,承载量和承载能力都将计及这些变化。受文献[11-14]的启发,本文也引入熵作为全局观测量,通过上述能够同时考虑结构与状态量变化的线路承载模型,提出衡量全网线路承载状态分布混乱程度的电气结构承载熵。

设线路 i 承载能力为 W_i , 实际承载量为 W_{ci} , 线路集合为 L , 则线路 i 的承载系数 μ_i 为:

$$\mu_i = \frac{W_i}{W_{ci}} \quad i \in L \quad (5)$$

与传统负载率相比,承载系数能反映计及电网结构与状态参数下线路承载情况,而并非单纯的潮流负载情况。承载能力并不表示最大承载量,对 μ_i 进行归一化处理,即:

$$\mu'_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\max}} \quad (6)$$

给定常数序列 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_k, \dots, U_v\}$, v 表示数列总项数,本文取 $U = \{0, 0.01, 0.02, \dots, 1.00\}$ 。用 n_k 表示承载系数 $\mu'_i \in (U_k, U_{k+1}]$ 的线路条数,不同承载系数区间内的线路条数概率为:

$$P(k) = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^{v-1} n_k} \quad (7)$$

其中, $P(k)$ 为承载系数 $\mu'_i \in (U_k, U_{k+1}]$ 的线路数占总线路数的比例; $v-1$ 表示所定义常数区间的间隔总数。

定义全网电气结构承载熵为:

$$H_w = -C \sum_{k=1}^{v-1} P(k) \ln P(k) \quad (8)$$

其中, C 一般为常数,本文中 C 取 $\ln 10$ 。

全网电气结构承载熵是根据线路承载能力与信息熵理论提出的评价全网所有线路承载情况分布有序程度的指标。采用信息熵理论对原有线路承载系数进行处理后,可以得知:承载熵值越小时,全网的承载系数处于同一区间的线路条数较多,这说明整个网络大多数线路所承担的输电任务跟自身输电能力及所处位置是相符合的;承载熵值越大,那么线路承载系数则较为分散地分布在各个数值区间,说明某些线路容量很大,但其输送功率较小且位于并不关键的位置,亦可能是某些线路容量较小,但输送功率较大且处于结构关键位置。电网在结构上可能存在重载区域,具有潜在风险。

2 考虑隐性故障的连锁故障仿真

为研究承载结构特性对于电网连锁故障的影响,本文采用文献[18]提出的基于隐性故障模型,研究系统处于不同初始承载熵水平下连锁故障停电规模与其累积概率分布的关系,并统计负荷损失数据,揭示在连锁故障发生过程中负荷损失情况与承载熵的关系。

2.1 隐性故障模型

隐性故障模型^[18]仿真流程如下:

- 设定隐性故障模型中系统的各项参数,如隐性故障概率 h 、发电机旋转备用比例 g 、线路 i 的最大容量系数 c_i 、控制措施参数 T_c ;
- 随机选择一条线路发生故障,使其跳开;
- 网络孤岛检测与处理,计算直流潮流;
- 判断是否有线路 i 的潮流 $F_i \geq F_i^{\max}$,若有潮流越限的线路,则使其跳开,返回步骤 **c**;
- 每当有线路跳开(过载或保护误动作),由隐性故障机理确定下一次可能发生隐性故障的线路,如有线路发生隐性故障,则使其因保护误动作而跳开,返回步骤 **c**;
- 当跳开线路条数 $T_{\text{trip}} \geq T_c$ 时,模拟电网进行调度并进行优化控制,并将 T_{trip} 置 0,但仍需判断有无隐性故障发生;
- 如无线路继续跳开,则判定连锁故障结束,统计本次仿真中负荷损失情况。

2.2 隐性故障仿真与结果分析

应用上述隐性故障模型对 IEEE 118 节点系统进行仿真,其中发电机旋转备用取 10%,线路隐性故障概率取 0.02,当跳开线路达到 3 次时进行优化控制,仿真次数为 5000 次。

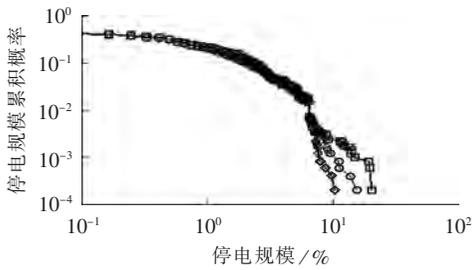
2.2.1 不同初始承载熵下仿真结果与分析

为研究承载熵对电网连锁故障的影响,本文通过调整线路最大输电容量来获取同一平均负载率下不同初始承载熵的系统状态^[12],并研究其对电网自组织临界性的影响。虽然在电网结构不变的情况下,通过调节负载率分布仅能使承载熵在 1.5~2.1 间变化,但已可看出初始承载熵的不同对电网自组织临界性具有一定影响。

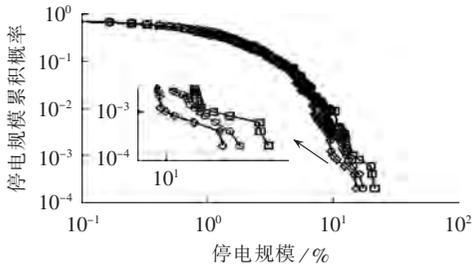
图 2(a)、(b)分别为平均负载率为 0.4 和 0.6 时,不同初始承载熵下停电规模累积概率分布曲线。本文仅讨论在平均负载率不变的初始条件下,承载熵与停电规模累积概率分布曲线的关系。从图中可以看出,随着承载熵值增加,停电规模累积概率分布曲线逐渐呈现幂率特征。承载熵不能完全表征当前系统是否已处于自组织临界态,但随着初始承载熵的不断增大,大停电事故累积概率分布曲线末端右移,逐渐出现“长尾”的现象,意味着系统发生大停电事故的概率有所增大。平均负载率为 0.4 时幂率特征变化现象较为明显,而当平均负载率不断提高时,承载熵所反映的趋势有所减缓,当平均负载率达到 0.8 以上时,系统已处于极度重载的情况,无论承载量如何分布,只要有故障发生,都极易引起连锁故障。

2.2.2 故障过程中负荷损失变化分析

取停电规模和故障线路条数均超过 40% 的停



(a) 平均负载率为 0.4 时,不同承载熵 H_w 下停电规模累积概率分布

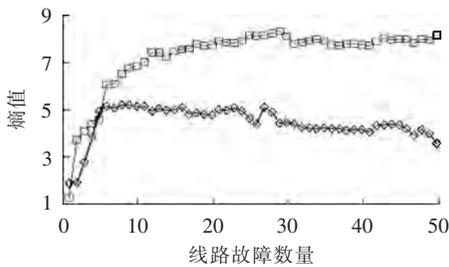


(b) 平均负载率为 0.6 时,不同承载熵 H_w 下停电规模累积概率分布
 —○— $H_w=1.6$, —□— $H_w=1.8$, —△— $H_w=2.0$

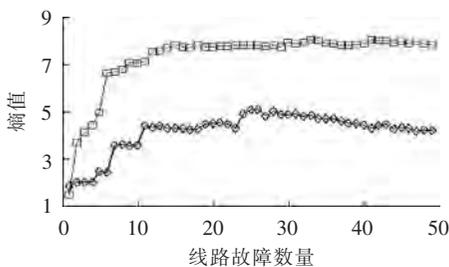
图 2 不同平均负载率和承载熵下停电累积概率分布

Fig.2 Outage cumulative probabilistic distribution for different average power flow rates and different carrying entropies

电事故进行统计,结果如图 3、图 4 所示。图 3(a)、(b)分别表示平均负载率为 0.4 与 0.6 时,连锁故障过程中潮流熵和承载熵的变化情况。图 4(a)、(b)分别表示平均负载率为 0.4 与 0.6 时,满足筛选条件的

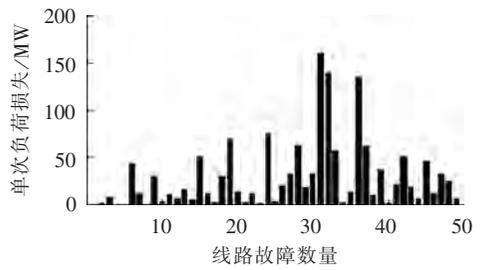


(a) 平均负载率为 0.4 时,潮流熵与承载熵变化趋势

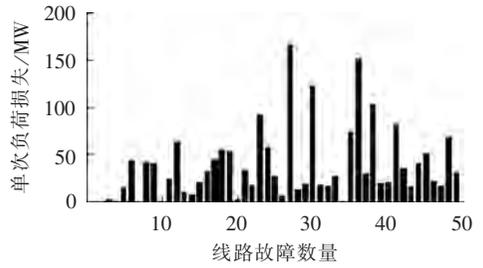


(b) 平均负载率为 0.6 时,潮流熵与承载熵变化趋势
 —□— 潮流熵, —○— 承载熵

图 3 连锁故障过程中潮流熵和承载熵的变化趋势
 Fig.3 Trend of power flow entropy and carrying entropy during cascading failure



(a) 平均负载率为 0.4 时,负荷损失变化趋势



(b) 平均负载率为 0.6 时,负荷损失变化趋势

图 4 连锁故障过程中负荷损失变化趋势

Fig.4 Trend of load loss during cascading failure

事故每切除一条线路时的单次负荷损失量的平均结果,反映了连锁故障过程中负荷损失的变化情况。

对比连锁故障仿真各时期承载熵、潮流熵以及负荷损失,可得以下现象:

①在连锁故障初期,观察图 4 可见电网并未发生大的负荷损失,但图 3 中潮流熵与承载熵都迅速增大,表明系统安全性正迅速下降;

②在连锁故障中期,图 3 中潮流熵值与承载熵值均处于较高水平,最大承载熵值分别为 5.07 和 5.08,线路潮流和承载量分布较为混乱,同时,图 4 中出现较大负荷损失,系统处于连锁故障传播扩散时期,系统安全性较为脆弱;

③在连锁故障末期,电网结构较初始状态已有较大变化,承载熵最终降低为 3.51 与 4.20,观察图 4 可见负荷损失也逐渐减小,表明系统趋于稳定,说明承载熵能够反映结构和状态的变化,而仅反映线路潮流分布均匀性的潮流熵则不具有这一特性,仍然处于较高水平。

2.2.3 基于隐性故障模型的仿真结果启示

通过上述仿真,本文认为承载熵能够反映当前系统的自组织临界性质,通过电网建设或改变运行方式能够使承载熵在一定程度内变化,在允许范围内调整线路承载量合理分布能够对电网发生大停电事故有一定抵制作用;另一方面,较传统潮流熵而言,承载熵计及了连锁故障过程中电网结构不断变化的特性,较好地反映了系统当前对连锁故障的抑制能力,系统在发生连锁故障时,若在优化调度中能考虑线路承载分布合理性,将有助于抑制连锁故障事故继续传播。

3 考虑承载结构的运行与规划防御策略

由仿真所得启示,为降低电网发生连锁故障事故概率,对大停电事故进行防御,本文考虑承载结构,提出在电网运行和建设两方面的连锁故障防御策略。

3.1 故障过程中的电网运行防御策略

在基于直流潮流的连锁故障模型中,一般有计及调度行为的最优控制策略,通常其目标函数为调整时使发电变化和负荷损失之和最小^[16,22]:

$$\min \sum_{g \in N_g} |p_g - P_{gk}| + \sum_{l \in N_l} S |p_l - P_{lk}| \quad (9)$$

其中, p_g 与 P_{gk} 分别为调整后与第 k 天时发电机节点功率注入量; p_l 与 P_{lk} 分别为调整后与第 k 天时负荷节点功率注入量; S 为切负荷成本折算系数,通常取较大数值以尽量保证经济性。

本文提出在连锁故障过程中考虑承载系数分布的电网运行最优控制策略,使承载量更加合理地分配到线路上,在允许范围内适度调整承载熵,让系统对连锁故障具有一定抵制作用。

由于熵是度量整个系统有序程度的量,计算过程中涉及对变量进行区间划分后的概率统计,将其直接写入目标函数并使其最小,可能引起大量功率转移。借鉴熵权系数法思想,根据每条线路承载系数区间分布统计结果,用式(7)中常数数列区间 $(U_k, U_{k+1}]$ 中包含线路数量 n_k 作为该区间内线路的熵权系数,意义在于:处于同一区间的线路条数越多,说明系统承载量分布越有序,承载熵值越小;若承载熵值越大,则说明包含线路条数较少的区间越多,线路承载系数分布越混乱;为在一定程度上控制承载熵值,理应更倾向于调整熵权系数较低的区间内线路的潮流,即着力调整承载“受力”过重或过轻的线路。在优化调度调整潮流时,也应满足尽量降低潮流转移量来减小其对系统冲击的原则。

本文基于当前潮流分布,将线路熵权系数作为潮流调整量的权重,可确定在不出现大规模潮流转移前提下,通过调整少量线路潮流来控制承载熵的优化原则。将考虑熵权系数的潮流变化量计入目标函数,并作归一化处理,最优控制策略修改如下:

$$\min \frac{\sum_{g \in N_g} |p_g - P_{gk}| + \sum_{l \in N_l} S |p_l - P_{lk}|}{\sum_{g \in N_g} \Delta p_g^{\max} + \sum_{l \in N_l} S \Delta p_l^{\max}} + \frac{\sum_{j \in N_j} n_{jk} |f_j - F_{jk}|}{\sum_{j \in N_j} n_{jk} \Delta f_j^{\max}} \quad (10)$$

系统总功率平衡:

$$\sum_{g \in N_g} P_g = \sum_{l \in N_l} P_l \quad (11)$$

线路潮流限值:

$$-F_{jk}^{\max} \leq f_j \leq F_{jk}^{\max} \quad (12)$$

基尔霍夫定律:

$$f_j = A_k p_j \quad (13)$$

负荷变化限值:

$$P_{ik} \leq p_i \leq 0 \quad i \in N_l \quad (14)$$

机组出力限值:

$$0 \leq p_i \leq p_i^{\max} \quad i \in N_g \quad (15)$$

其中, Δp_g^{\max} 为节点 g 功率注入变化最大量; n_{jk} 为线路 j 的熵权系数; f_j 为线路 j 调整后流过的潮流值; F_{jk} 为当前线路潮流值; Δf_j^{\max} 为潮流变化最大量; A_k 由第 k 天的电网导纳矩阵计算求得; F_{jk}^{\max} 为第 k 天线路 j 的最大传输容量; p_i^{\max} 为发电机节点 i 的最大功率输出。

与传统的目标函数对比,式(10)增加了对于线路潮流变化量的限制,目的是控制承载熵的变化幅度,这将削弱系统控制发电机出力变化和负荷损失的能力,可能造成在优化计算时增加小量负荷损失,但却有助于在发生故障后对于电网的承载状态进行有效控制,降低线路承载分布混乱程度,这也是符合连锁故障防御原则的。

3.2 电网建设中的防御策略

诸多研究表明网络结构初始状态与自组织临界性也有密切联系,因此在电网建设规划阶段也可加入对初始承载熵的控制,以减少电网发生大停电事故的概率。本文不考虑新节点和新线路的生长模型,仅根据当前负荷水平及发电机容量增长来制定考虑承载量分布的线路升级扩容方案。

考虑电网建设的连锁故障模型通常采取固定模式或比例进行线路改造,如 OPA 模型在慢动态中仅针对故障断开的线路进行扩容,改进 OPA 模型考虑了线路负载率的情况,在扩容前进行潮流计算,对负载率超过 ε 的线路进行固定比例扩容。本文认为在电网规划建设过程中,可考虑承载量分布情况,制定更合理的扩容方案,原因在于负载率超过 ε 的线路承载情况亦可能有较大差异,如处于大功率汇集区的线路比普通线路更易引起连锁故障,扩容需求更大。

为与传统扩容方案进行对比,同时消除不同扩容策略所确定扩容总量不同带来的影响,本文基于 OPA 模型中慢动态建设过程提出考虑承载熵的与传统方案等量扩容的主动防御策略。

根据扩容需求负载率 ε 确定需扩容线路集合 E ,按容量增长因子 λ 确定与传统扩容方案相等的扩容总量 Q 。

$$Q = \sum_{j \in E} \lambda F_{jk}^{\max} \quad (16)$$

其中, F_{jk}^{\max} 为第 k 天线路 j 的最大传输容量。

由线路承载系数与熵权系数确定集合 E 内各条线路的扩容分配值 G_j ,其意义在于承载较重且熵权系数小的线路扩容需求大且对承载熵影响也大,按扩容需求进行线路扩容,可在一定程度上控制承载系数

分布,缓解线路承载压力。

$$G_j = \frac{\mu_j}{n_{jk}} \quad (17)$$

各条线路扩容增量由扩容总量按各条线路扩容分配值占总分配值的比例分摊确定。

$$\Delta F_{j(k+1)}^{\max} = \frac{G_j}{\sum_{j \in E} G_j} Q \quad (18)$$

其中, $\Delta F_{j(k+1)}^{\max}$ 为第 $k+1$ 天线路 j 的最大传输容量的增量。

4 计及防御策略后的连锁故障仿真

4.1 加入防御策略的连锁故障模型

上节提出了在电网运行和建设 2 个方面的防御策略,为将其应用于连锁故障仿真,需将第 2 节中的连锁故障模型扩展为带有电网建设过程的模型。本文在隐性故障模型和改进 OPA 模型^[22]的基础上,结合所提防御策略,提出在连锁故障和电网建设过程中加入对承载熵的控制策略的连锁故障仿真模型。式(10)—(15)组成运行防御策略并计入内层快动态过程,式(16)—(18)组成建设防御策略并计入外层慢动态过程,具体仿真流程如图 5 所示。

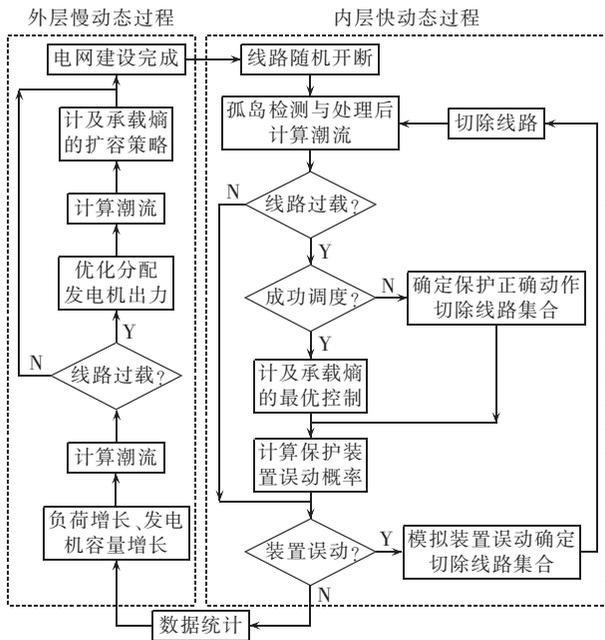


图 5 加入防御策略的连锁故障仿真流程图

Fig.5 Flowchart of cascading failure simulation with defense strategy

a. 设定连锁故障模型中的各项参数:线路随机故障概率 τ , 负荷增长率 β , 线路容量增长因子 δ , 保护装置误动概率 σ , 保护装置拒动概率 ξ , 扩容需求负载率 ε , 优化控制成功概率 η , 负荷损失代价因子 L , 慢动态天数 d 。

b. 执行快动态过程,模拟由于随机因素导致线路以概率 τ 开断,孤岛检测处理后,计算直流潮流,根据线路越限情况与优化控制成功概率 η 按式

(10)—(15)进行优化调度。

c. 根据保护动作概率确定是否切除线路。

d. 若有线路被切除,则进入步骤 **b**, 否则统计快动态过程数据,进入步骤 **e**。

e. 执行慢动态过程,若当前天数 k 小于设定天数 d ,则根据负荷增长因子 β 确定第 $k+1$ 天负荷水平及发电机最大出力,否则仿真结束。

f. 进行直流潮流计算与优化计算,并根据线路功率越限与切负荷情况,按备用容量比例确定发电机出力分摊增量。

g. 再次进行潮流计算,按式(16)—(18)对负载率超过 ε 的线路进行升级扩容,模拟电网规划与建设,慢动态过程结束,转入步骤 **b**。

4.2 实际电网连锁故障模拟

根据本文所提加入防御策略后的连锁故障模型,对西南某省实际电网按第 4.1 节所述流程进行仿真。观察加入计及承载结构的防御策略改善承载分布后对于电网大停电事故累积概率的影响,并针对该省实际情况,对线路承载进行排序与分析。

该省电网含 680 个节点(含发电机节点与广义负荷节点)、977 条支路(含输电线路与等效变压器支路),2012 年峰值负荷约为 19907 MW,2013 年峰值负荷约为 23324 MW,可计算全年负荷增长率为 0.1716,折算可得快动态中日负荷增长率约为 1.00047,模型中参数见表 2。

表 2 连锁故障仿真模型参数
Table 2 Parameters of cascading failure simulation model

参数名	文中符号	参数值
负荷增长率	β	1.00047
线路随机故障概率	τ	0.001
线路容量增长因子	δ	1.005
保护装置拒动概率	ξ	0.001
保护装置误动概率	σ	0.001
扩容需求负载率	ε	0.9
优化控制成功概率	η	0.95
负荷损失代价因子	L	100
仿真天数	d	3650 d

图 6 为加入主动防御策略前后停电规模累积概率分布曲线,从图中看出,加入防御策略后,小规模停电事故概率虽有略微上升,但大规模停电事故概率有所改善,在一定程度上说明计及承载熵的防御策略利用少量负荷损失作为代价,对承载分布进行有效控制,增加系统对于连锁故障的抑制能力,在系统承受范围内降低了大规模停电事故发生的概率。

另一方面,对电网线路承载情况进行统计,列出承载较重的线路如表 3 所示,并绘制如图 7 所示的全网承载系数分布图,用以观察电网线路承载分布情况。通过表 3 可知,从线路负载率来看,500 kV 与

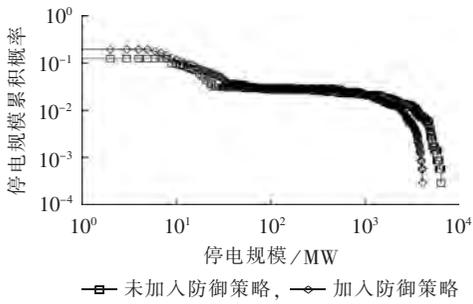


图 6 某省电网停电规模累积概率分布曲线
Fig.6 Outage cumulative probabilistic distribution of a provincial power grid

表 3 承载系数排名前 10 的线路

Table 3 Carrying coefficient of top ten lines

线路	电压等级/kV	承载系数	负载率
谭家—龙王	500	1.00	0.25
谭家—丹景	500	0.92	0.17
桃乡—龙王	500	0.67	0.14
蜀州—丹景	500	0.41	0.08
龙王—团结	220	0.41	0.61
龙王—柏合	220	0.32	0.32
谭家—南充	500	0.32	0.02
龙王—大同	220	0.27	0.39
云绣—龙王	220	0.26	0.39
二台—丹景	220	0.24	0.28

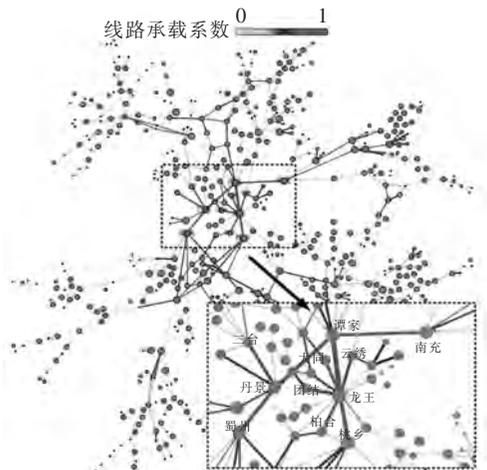


图 7 某省电网承载系数分布图
Fig.7 Carrying coefficient distribution of a provincial power grid

220 kV 输电线路负载率并不高,甚至某些线路的负载率很低,但其承载系数较大,说明其在电气结构上处于“承载受力”较重的区域或自身“承载受力”较重,而传统方法从负载率角度出发则无法反映这一现象。观察图 7 可得,当前全网承载分布有很不均匀的区域,正好对应表 3 中大部分线路所在区域,该区域是该省网的重要负荷区域,属于存在大量负荷以及大功率汇集的地区,与本文第 1 节对于线路承载量的定义相符合。

图 8 所示为该省网 500 kV 网架结构图,从图 8 中可知,谭家、龙王、桃乡、丹景、蜀州等节点及其之

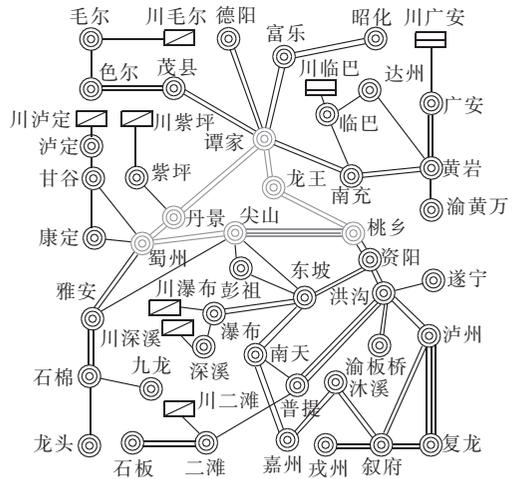


图 8 某省 500 kV 网架结构

Fig.8 Topology of a provincial 500 kV power grid

间的线路构成了该省网南北输电断面,且负荷较重,是电气结构上的重载区域。除尖山与桃乡的联络线外,其余线路承载系数均排名靠前。从图中可以看出,尖山—桃乡线路虽处于关键结构位置,但因其有 3 条并架回路,保证其传输能力与其关键程度相匹配,故不是“受力”较重线路,与本文第 2 节对于线路承载系数的定义相符。在慢动态过程中,对线路进行升级扩容时,本文策略考虑了以上因素,同时计及负载率与承载系数再进行扩容,使电网更加坚强,也在一定程度上提升了系统对于连锁故障的抵御能力,具有一定合理性。

5 结论

本文在分析电网复杂网络结构和电气状态的基础上,结合熵理论提出揭示全网承载分布特性的承载熵,并分析了承载分布对于电网连锁故障的影响,仿真表明:系统初始承载熵值能够在一定程度上反映当前电网状态,初始电网线路承载系数分布与大停电发生概率具有一定关联性;在电网运行过程中,承载熵值变化与负荷损失变化情况一致,说明计及电网结构特性的承载熵在电网架构发生较大变化时仍能够较好地反映当前系统安全性。

基于以上 2 点启示,本文提出了同时在电网运行和规划建设环节中针对连锁故障的防御策略,对电网发生大规模停电事故进行预防控制。针对实际电网仿真表明:采用文中所提的 2 个层面的防御策略后,大停电事故概率有所下降,考虑承载系数的扩容策略可使全网承载分布更合理,将阻止少量关键或脆弱线路成为连锁故障触发源,验证了本文指标体系与防御策略具有一定的工程适用性。

参考文献:

[1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”

- 大停电的警示[J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
- XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster-lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(18):1-5.
- [2] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11,16.
- YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America Power Grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology,2003,27(10):8-11,16.
- [3] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
- TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31,2012[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):167-174.
- [4] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American Power Grid[J]. Physical Review E,2004,69(2):25103.
- [5] 丁明,韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10):20-25.
- DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(10):20-25.
- [6] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M. A topological analysis of the Italian Electric Power Grid[J]. Physica A:Statistical Mechanics and Its Applications,2004,338(1):92-97.
- [7] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):33-39.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):33-39.
- [8] 徐林,王秀丽,王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):61-68.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):61-68.
- [9] 刘文颖,梁才,徐鹏,等. 基于潮流介数的电力系统关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):90-98.
- LIU Wenying, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(31):90-98.
- [10] 王涛,王兴武,顾雪平,等. 基于概率及结构重要度的电力系统事故链模型与仿真[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):51-56.
- WANG Tao, WANG Xingwu, GU Xueping, et al. Power system fault chain model and simulation based on probability and structural importance[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):51-56.
- [11] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):40-46.
- LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):40-46.
- [12] 曹一家,王光增,曹丽华,等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):1-6.
- CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized critical state of power grid based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(7):1-6.
- [13] 刘文颖,王佳明,谢昶,等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):142-149.
- LIU Wenying, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):142-149.
- [14] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术,2013,37(10):2754-2761.
- GOU Jing, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Energy entropy measure based risk identification of power system cascading failures[J]. Power System Technology,2013,37(10):2754-2761.
- [15] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):1-9.
- XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(19):1-9.
- [16] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]//Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, HI, USA: [s.n.],2001:710-718.
- [17] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E. A loading-dependent model of probabilistic cascading failure[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences,2005,19(1):15-32.
- [18] CHEN J, THORP J S. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. Electrical Power and Energy System,2005,27(4):318-326.
- [19] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报,2008,19(4):20-25.
- WANG Yayong. Lessons learnt from building damagers in the Wenchuan earthquake—seismic concept design of buildings[J]. Journal of Building Structures,2008,19(4):20-25.
- [20] WANG W X, CHEN G. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure[J]. Physical Review E,2008,77(2):026101.
- [21] 王建伟,荣莉莉. 基于负荷局域择优重新分配原则的复杂网络上的相继故障[J]. 物理学报,2009,58(6):3714-3721.
- WANG Jianwei, RONG Lili. Cascading failures on complex networks based on the local preferential redistribution rule of the load[J]. Acta Physica Sinica,2009,58(6):3714-3721.
- [22] 梅生伟,何飞,张雪敏,等. 一种改进的 OPA 模型及大停电风险评估[J]. 电力系统自动化,2009,32(13):1-5.
- MEI Shengwei, HE Fei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model and the evaluation of blackout risk[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,32(13):1-5.

作者简介:



刁 塑

刁 塑(1990—),男,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为电力系统连锁故障与防御(E-mail:dekker_diao@foxmail.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统稳定性分析、电力市场、主动配电网运行规划模拟与优化;

刘友波(1983—),男,四川成都人,讲师,博士,研究方向为电力系统连锁故障及运行大数据应用(E-mail:liuyoubo@scu.edu.cn)。

Cascading failure simulation and defense strategy considering grid carrying structure

DIAO Su¹, LIU Junyong¹, LIU Youbo¹, LIU Tingjian¹, DING Lijie², BAZARGAN Masoud³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

3. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: A power grid carrying structure model based on complex network and information entropy is proposed, the indexes, such as transmission line carrying capacity, carrying coefficient and whole-grid electrical structure carrying entropy, etc., are defined, and the qualitative relationship between it and the self-organized criticality of power grid is researched. The simulation of IEEE 118-bus system reveals that, the carrying structure can reflect the variation of grid structure and operating state, and there is macroscopic relevance between the carrying entropy variation and the load loss variation, based on which, a bi-level defense strategy against cascading failure is proposed to optimize the fault control and plan the grid development, and a cascading failure simulation model applying the defense strategy is built. A cascading failure simulation for a practical power grid verifies the rationality of the proposed indexes and the comparison of outage cumulative probabilistic distribution curve between with and without defense strategy verifies its effectiveness.

Key words: complex network; cascading failure; carrying entropy; self-organized criticality; defense

(上接第 142 页 continued from page 142)

Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 505-513.

[21] WU Y C, DEBS A S, MARSTEN E. A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 876-883.

[22] 孟祥星, 韩学山, 潘珂. 无功优化问题三类解的物理特性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 15-20.

MENG Xiangxing, HAN Xueshan, PAN Ke. Physical characteristics analysis on three types of solutions of reactive power optimization problem[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 15-20.

[23] 潘志远, 韩学山, 刘超男. 交流潮流约束下的机组组合求解[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(2): 130-137.

PAN Zhiyuan, HAN Xueshan, LIU Chaonan. Unit commitment considering alternating current power flow constraints[J]. Journal of Shandong University of Technology: Engineering Science, 2012,

42(2): 130-137.

作者简介:



孙东磊

孙东磊(1988—), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事电力系统源网协同理论研究与应用技术开发工作 (E-mail: sdsudlei@sina.com);

韩学山(1959—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

张波(1963—), 男, 山东威海人, 教授, 主要从事电力系统运行与控制领域的研究和教学工作。

Voltage-support decision-making model considering power network topology optimization

SUN Donglei, HAN Xueshan, ZHANG Bo

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The voltage support of power system is the result of coordination and cooperation between source (generation units and loads) and grid. The integration of transmission and distribution systems and the bidirectional power flow in power system result in the complex contradiction between source and grid, which causes the incoherent phenomenon in the source-dependent voltage support of power network. A voltage-support decision-making model with the constraint of transformer over-load tap-changing blocking is built and solved by the combination of the genetic algorithm and the nonlinear primal-dual interior point method, which takes the conditional adjustment of power grid structure as a decision-making variable when the source balance mode is given. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method, showing the necessity of implementing the synergy between source and network in future multivariate power system.

Key words: electric power systems; voltage support; incoherence; electric network topology; optimization; smart grid; synergy between source and network