

基于复杂网络理论计及校正控制的 电力系统连锁故障模型

王 韶¹, 刘沛铮¹, 董光德², 张煜成¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 为在基于复杂网络理论的连锁故障模型中计及校正控制的影响, 提出基于潮流追踪的按比例削减负荷与有功网损最小的最优潮流模型相结合的校正控制方法。该方法采用潮流追踪技术, 在节点故障后形成的孤岛子系统中, 根据转移负荷确定负荷削减区域, 并进行削减负荷。基于复杂网络理论提出计及该校正控制方法的电力系统连锁故障模型。该模型克服了只在拓扑层面对连锁故障描述的缺陷, 能够反映负荷分布的变化对连锁故障的影响。通过对 IEEE 30 节点系统的仿真计算验证了所提校正控制措施的可行性和有效性。仿真结果表明, 所提校正控制措施可在负荷分布均匀时减小连锁故障发生的规模。

关键词: 复杂网络; 节点介数; 电力系统; 连锁故障; 校正控制

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.024

0 引言

近年频发的大停电事故引起人们对电网安全性的广泛关注^[1-5]。统计分析表明, 大电网中个别元件故障可能导致其他元件因潮流重新分配而退出运行, 最终演化为雪崩式的大规模连锁故障甚至系统崩溃^[1]。作为电网内在固有特征的拓扑结构对连锁故障的发生和系统脆弱性具有重大影响^[6-11]。因此, 构建合理的连锁故障模型, 对研究电网结构特性与连锁故障的关联性、降低连锁故障发生概率及减小其影响范围具有重要意义。

目前, 基于复杂网络理论研究电力系统结构特性的模型^[12], 包括运用各种介数^[13-21]判断故障发生后是否会引起连锁故障和故障后的调整控制两部分。现有的研究更多的是在拓扑结构层面, 较少考虑故障后电力系统校正控制手段。文献^[14-15]通过减少介数值超过自身容量的节点的路径条数来模拟校正控制, 文献^[16, 18]通过调整线路电抗实现校正控制。文献^[16]划分了校正控制的使用范围, 认为节点介数如果大于该节点的运行极限, 则直接将该节点移除而不进行调整控制。由于文献^[14-16, 18]在连锁故障模拟的过程中均未进行潮流分析, 因此其校正控制手段也仅限于拓扑层面, 与电力系统实际的校正控制相差较大。事实上, 假设电力系统中每条线路的权值或阻抗均可调节并不符合电网的实际情况。而且在移除因故障引起介数过载的节点或线路后, 极有可能发生系统过负荷导致的潮流不收敛, 甚至引发全网停电事故。而这种事故并不能通过这些文献给出的校正控制手段来改善。虽然文献^[19-20]在

连锁故障过程中计算了系统潮流, 但文献^[19]以潮流不收敛作为故障结束标志, 未进行校正控制; 文献^[20]在计算关键线路故障丢失的负荷量时调整发电机出力的目的仅是为了保持功率平衡, 没有研究校正控制对连锁故障过程的影响。

针对上述问题, 本文建立了基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型。该模型在模拟连锁故障过程中, 根据电力系统运行情况, 以潮流分布为基础, 将基于潮流追踪的负荷削减方法与有功网损最小的最优潮流模型结合, 交替计算形成校正控制措施。通过对 IEEE 30 节点系统进行的仿真计算表明, 在连锁故障模拟过程中实施校正控制, 可以显著减小连锁故障发生的规模, 提高电网防御连锁故障的能力; 节点裕度系数和负荷分布对连锁故障的作用会受到校正控制影响。

1 节点的潮流介数和介数容量

在复杂网络理论中, 节点介数表征一个节点在电能传输中所起的作用, 其初始定义为节点被网络中所有节点之间最短路径经过的次数^[13]。结合电力系统的实际, 文献^[21]提出的节点的潮流介数为:

$$B_i(n) = \sum_{y \in G, z \in L, m \in B} \sqrt{W_y W_z} P_{m(n), y, z} \quad (1)$$

其中, $B_i(n)$ 为节点 n 的介数; G 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合; B 为输电路径集合; n, y 和 z 分别为输电路径 B_m 的节点、发电机节点和负荷节点; W_y 为发电机节点 y 的权重 (有功出力值); W_z 为负荷节点 z 的权重 (有功负荷值); $P_{m(n), y, z}$ 为输电路径 B_m 经过节点 n 的输电路径有功功率。

由于在校正控制的优化潮流计算中, 节点的有功

负荷不变,而作为可控变量的发电机有功出力是主要的调节因素。为增大校正控制对节点介数的影响,本文采用的节点潮流介数和介数容量^[14]分别为:

$$B_i(n) = \sum_{y \in G, z \in L, m \in B} W_y P_{m(n), y, z} \quad (2)$$

$$C_n = \alpha B_{i0}(n) \quad (3)$$

其中, C_n 为节点 n 的介数容量; $B_{i0}(n)$ 为节点 n 在正常情况(即初始情况)下的介数值; α 为节点裕度系数, $\alpha \geq 1$ 。

2 计及校正控制的电力系统连锁故障模拟

本文采用的校正控制手段包括调整发电机出力及负荷削减。

2.1 调整发电机出力的最优潮流模型

发电机出力调节的模型采用以系统有功网损最小的最优潮流模型^[22]。具体为:

$$\min \Delta P = \sum_{i \in G} P_{gi} - \sum_{j \in L} P_{dj} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ P_{gi, \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi, \max} \\ Q_{gi, \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi, \max} \\ U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \\ S_l \leq S_{l, \max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{gi} 、 Q_{gi} 和 P_{dj} 分别为节点 i 的发电机有功、无功出力和节点 j 的有功负荷; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功和无功注入; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的互电导和互电纳; U_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电压相角差; $P_{gi, \max}$ 、 $P_{gi, \min}$ 和 $Q_{gi, \max}$ 、 $Q_{gi, \min}$ 分别为节点 i 的发电机有功和无功出力的上、下限; $U_{i, \max}$ 和 $U_{i, \min}$ 分别为节点 i 的电压幅值上、下限; S_l 和 $S_{l, \max}$ 分别为流过线路 l 的视在功率和载流容量。

用式(4)和式(5)调节发电机出力,能与电网运行调度目标接近,得到更接近实际电力系统的潮流。

2.2 基于潮流追踪的负荷削减方法

大电网中发生的故障被切除后,潮流会发生转移和重新分配。根据故障时退出运行的节点类型的不同,可归结为以下2种情况。

a. 发电机节点退出运行。设节点 $g \in G$, D_g 为由节点 g 提供电能的负荷节点组成的集合。当节点 g 退出运行后, D_g 中原本由节点 g 提供的负荷将转移。

b. 联络节点退出运行。设节点 n 为联络节点, D_n 为由通过节点 n 的输电路径 B_n 提供电能的负荷节点组成的集合。若节点 n 退出运行后系统会解列成可运行的孤岛 i , 则把 $D_{i,n}$ 定义为在孤岛 i 中属于 D_n 的负荷节点组成的集合。无论节点 n 退出运行后系统是否出现解列, D_n 的负荷将发生转移。

由上可见,无论退出运行的是发电机节点还是联

络节点都将引起负荷转移,从而可能导致系统产生功率缺额,引起部分线路过载或电压越限。由于潮流大规模转移是导致系统发生连锁故障的主要原因之一,因此如果故障后系统不能正常运行而不得已需要削减负荷时,能根据潮流转移情况削减负荷,就能够快速有效地消除故障蔓延的风险,防止系统因潮流重新分配导致的大停电故障。潮流追踪方法^[23]可追踪转移的负荷功率,故可用于负荷削减。文献[24]采用一种基于潮流追踪的直流潮流负荷削减模型。本文考虑到计算精度和时间的平衡,将基于潮流追踪的按比例削减负荷方法与有功网损最小的最优潮流模型相结合,通过交替计算来模拟事故后的校正控制措施。每次削减负荷后,通过最优潮流调整系统的运行方式使其能够回到安全正常状态。负荷削减流程具体步骤如下。

a. 运用潮流追踪方法确定通过退出运行的节点的输电路径^[21]。

b. 根据故障时退出运行的节点类型和系统解列情况,将 D_g 、 D_n 或 $D_{i,n}$ 确定为削负荷区域。如果有多个节点同时退出运行,则将削负荷区域确定为每个退出运行节点的负荷区域的并集。

c. 如果负荷削减区域中有负荷,则转到步骤 **d**, 否则,将负荷削减区域向外层节点的相邻节点扩展形成新的负荷削减区域,转到步骤 **d**。

d. 在负荷削减区域内按比例平均削减负荷。该过程中保持节点负荷的功率因数不变。

e. 计算系统的有功网损最小的最优潮流,若潮流收敛,则停止削减负荷;否则,转到步骤 **c**。

上述方法也可用于系统功率有缺额时的负荷削减,只是此时只需计算普通交流潮流。

2.3 计及校正控制的电力系统连锁故障模型

本文建立的计及校正控制的电力系统连锁故障模型如图1所示。其模拟连锁故障的过程如下。

a. 用最优潮流确定系统正常运行时各节点的介数和介数容量。

b. 随机或有针对性地移除系统中的一个节点。

c. 孤岛辨识及形成,平衡孤岛系统功率。若其发电机总出力有余额,则按发电机出力余额占发电机总出力的比例减小各发电机实际出力;否则,按照各发电机旋转备用比例增加各自实际出力。

d. 判断功率是否平衡。如果功率平衡,则转步骤 **e**; 否则,削减负荷后转步骤 **e**。

e. 用基于牛拉法的潮流算法计算交流潮流,若潮流收敛且无线路和电压越限,转到步骤 **g**, 否则转步骤 **f**。

f. 计算最优潮流,若潮流不收敛,则削减负荷后

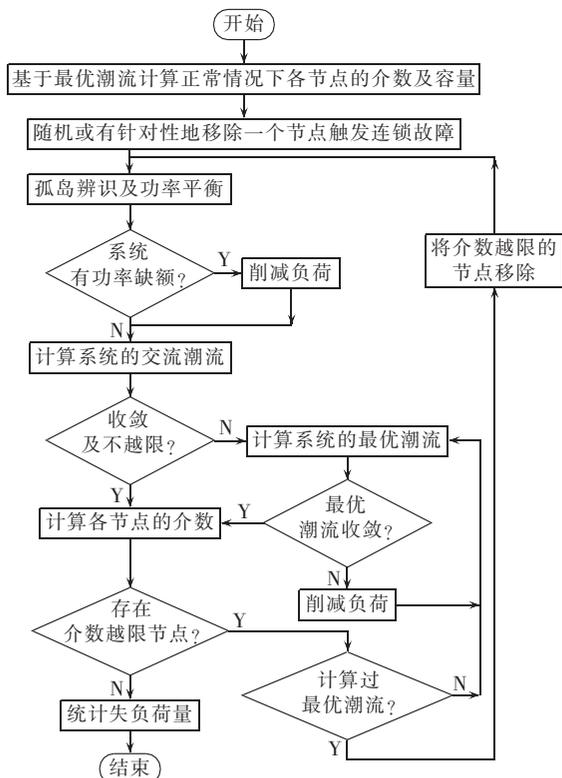


图 1 计及校正控制的电力系统连锁故障模型

Fig.1 Power system cascading failure model considering corrective control

再计算最优潮流,如此循环直到收敛为止,转步骤 g。

g. 计算各节点介数值。若存在介数超限节点,转步骤 h; 否则,统计系统的失负荷量,结束模拟。

h. 若计算过最优潮流,则表明不能再减小这些节点的介数值,将其移除后转步骤 c; 否则,转步骤 f。

3 算例分析

本文采用 IEEE 30 节点系统为测试系统,接线如图 2 所示^[22],系统数据见文献[25-26]。该系统总装机容量为 335 MW,总负荷为 189.2 MW。计算时最优潮流不收敛时的削负荷比例取为 10%。

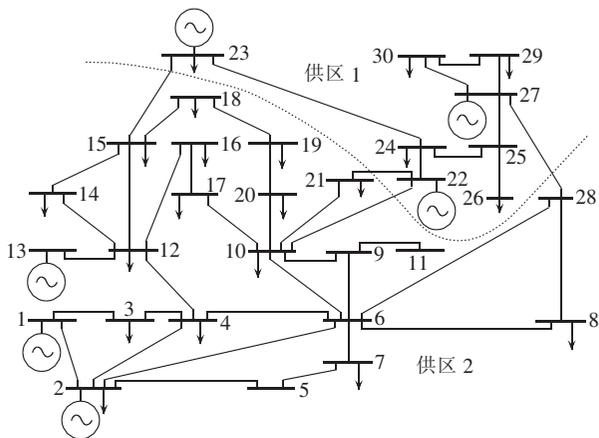


图 2 IEEE 30 节点系统接线图

Fig.2 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

3.1 校正控制对连锁故障的影响

3.1.1 调整发电机出力对连锁故障的影响

为分析调整发电机出力对连锁故障的影响,用本文方法分 2 种情况分别计算移除节点 2、3、7 和 23 后系统的失负荷量和连锁故障结束时退出运行的节点数。情况 1 和 2 在模拟连锁故障校正控制时分别采用交流潮流和网损最小的最优潮流进行计算,2 种情况的负荷削减方法相同。情况 1 和 2 实际是分别模拟发电机出力不调整和调整 2 种情况。取 $\alpha=1.6$,2 种情况的计算结果如表 1 所示。

表 1 调节发电机出力对连锁故障的影响

Table 1 Effect of generator output adjustment on cascading failure

移除的节点号	失负荷量/MW		退出运行的节点个数	
	情况 1	情况 2	情况 1	情况 2
2	140.10	118.35	17	9
3	155.20	2.40	21	1
7	32.80	22.80	6	1
23	129.95	61.58	20	7

由表 1 可见,在分别移除节点 2 和 23 时,情况 1 的失负荷量分别为 140.10 MW 和 129.95 MW,大于情况 2 的失负荷量 118.35 MW 和 61.58 MW,情况 1 的连锁故障结束后系统退出运行的节点个数分别为 17 和 20,多于情况 2 退出运行的节点个数 9 和 7。因此,情况 2 的连锁故障规模较小。在分别移除节点 3 和 7 时,情况 1 的失负荷量分别为 155.20 MW 和 32.80 MW,退出运行的节点个数分别为 21 和 6,而情况 2 仅分别失去被移除节点及负荷 2.40 MW 和 22.80 MW,没有造成连锁故障的发生,即情况 2 的故障被抑制。

由上可见,当采用优化潮流进行发电机出力调控后,由于优化配置了发电机功率,使得电能更易就近平衡,从而有效减小了连锁故障发生的规模,甚至抑制了连锁故障的发生。因此连锁故障模拟中应该计及发电机出力调整对连锁故障的影响。

3.1.2 不同削负荷方法对连锁故障的影响

为分析本文负荷削减方法的有效性,对比了 2 种方法的负荷削减量。方法 1 采用的是本文基于潮流追踪按比例削减负荷与有功网损最小的最优潮流模型相结合交替求解负荷削减量。方法 2 是在最优潮流不收敛时,不断按照一定比例切除重载线路两端节点以及达到电压下限限制节点的负荷直到潮流收敛。当负荷削减次数超过一定限制但潮流仍不收敛时,则不再进行调整,并认为大停电发生^[22]。

为获得重载线路两端节点以及达到电压下限限制节点,本文以功率平衡后收敛的普通交流潮流为依据。若该潮流此时也不收敛,则随机选择节点进行负荷削减。取负载率大于 0.7 的线路为重载线路,电

压低于 0.9 p.u. 的节点为低电压节点。削负荷比例为 10%。若负荷削减次数超过 10 次,则认为大停电发生。 α 取为 1.6。用 2 种方法计算移除节点 13、27、28 后系统的失负荷量,结果如表 2 所示。

表 2 不同负荷削减方法对连锁故障的影响
Table 2 Effect of load-shedding method on cascading failure

移除的节点号	失负荷量/MW	
	方法 1	方法 2
13	128.88	189.20
27	137.99	151.92
28	15.84	119.07

在表 2 中,方法 1 的失负荷量比方法 2 的小。这是因为方法 1 能够根据潮流转移情况更有效地削减负荷。例如,在移除节点 28 后,方法 1 和 2 的负荷削减区域分别是 {6, 7, 8} 和 {6, 8, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 27}; 都经过 3 次负荷削减,分别共削减 15.84 MW 和 20.28 MW 后最优潮流收敛。此时方法 1 因无节点介数超限结束计算;而方法 2 有节点介数超限将继续计算导致最终失负荷 119.07 MW。可见,尽管 2 种方法都采用了相同的最优潮流模型且具有相同的负荷削减次数,但方法 1 的负荷削减区域更小,负荷削减量更少,还有抑制连锁故障扩大的作用。

3.2 校正控制和节点裕度系数对连锁故障的影响

为分析及校正控制后,裕度系数 α 对连锁故障的影响,用本文方法计算 α 取 1.5~3 时移除节点 22 之后造成的系统失负荷量,结果如图 3 所示。

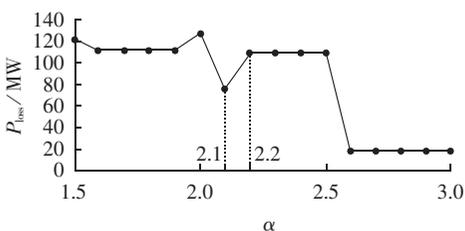


图 3 移除节点 22 后系统的失负荷量

Fig.3 System load loss after Node 22 removed

由图 3 可见,随着 α 的增加,系统失负荷量总的趋势是下降的。但值得指出的是,在 α 增大时,系统的失负荷量在下降过程出现了反弹现象。如图 3 中, α 为 2.2 时的系统失负荷量大于 α 为 2.1 时系统的失负荷量。为分析其原因,分别将这 2 种情况具体的模拟过程列出如下。

a. α 为 2.1 时移除节点 22。经校正控制潮流收敛后节点 1、2、3、5、9 和 10 因介数超限被移除,同时造成节点 11 和 21 被移除,导致失负荷 47.40 MW; 经校正控制削减负荷 28.14 MW 后潮流收敛,系统回到安全状态。其失负荷总量为 75.54 MW。

b. α 为 2.2 时移除节点 22。经校正控制潮流收敛后节点 1、3 和 9 因介数超限被移除,失负荷 2.4 MW,

同时造成节点 11 被移除;经过校正控制削减负荷 15.84 MW 后潮流收敛;其后节点 2、4、5 和 16 因介数超限被移除,失负荷 29.52 MW;经校正控制削减负荷 61.66 MW 后潮流收敛,系统回到安全状态。其失负荷总量为 109.42 MW。

由上可见,在 2 种事故演化过程中,由于 α 为 2.2 时移除节点 22 后节点 2、5、10 没有退出运行,尽管失负荷量小,但使校正控制阻止连锁故障继续发展的效果降低。而随后的事故演化却引起故障进一步扩大,导致需要削减更多负荷才能阻止事故发展。因此,在 α 较小时,有些节点在故障初期就退出运行反而强化了校正控制在故障演化初期的作用,使整个连锁故障的规模减小。所以节点裕度系数对连锁故障的作用会受到校正控制影响。

3.3 校正控制和不同负荷分布对连锁故障的影响

在现有基于复杂网络理论研究电力系统结构特性的文献中,没有讨论计及校正控制在相同网架结构下负荷分布变化对连锁故障的影响。然而校正控制和不同负荷分布都会对连锁故障中潮流转移带来影响,从而影响连锁故障的规模。因此本文分析比较了同一网架结构在计及校正控制时不同负荷分布对连锁故障的影响。

分 2 种负荷情况计算,负荷情况 1 如图 2 所示,负荷情况 2 为把图 2 中供区 2 正常时各节点的负荷减小 30%,将其减小的负荷平均分摊到供区 1 的 8 个节点中,系统负荷总量不变。2 种负荷情况下正常最优潮流在两供区间联络线上传输的有功功率如表 3 所示。由表 3 可见,2 种负荷情况下,联络线 22-10 的功率变化较小;其余联络线功率在负荷情况 2 时均有较大减小。此时,系统在负荷情况 1 和 2 下的平均负载率分别为 0.3019 和 0.2938,表明更好地就地平衡了负荷。

表 3 2 种负荷情况联络线传输的有功功率

Table 3 Active power of tie-lines for two load conditions

联络线两端节点号及功率流向	负荷情况 1/MW	负荷情况 2/MW
	22→10	8.52
22→21	27.88	23.87
23→15	9.81	6.10
27→28	18.18	6.52

用本文的连锁故障模拟方法分别对 2 种负荷情况逐个模拟各节点故障后系统失负荷量随 α 的变化情况。结果分别如图 4 和图 5 所示(N 为节点号)。

由图 4 可见,在相同网架结构和负荷分布下,连锁故障造成图(a)的失负荷量大多数都在 150 MW 以上,而在图(b)中只有 4 个节点被移除时失负荷量超过 100 MW。在图 5 中,图(a)的失负荷量大多数都在 100 MW 以上,而图(b)中只有 2 个节点被移除时

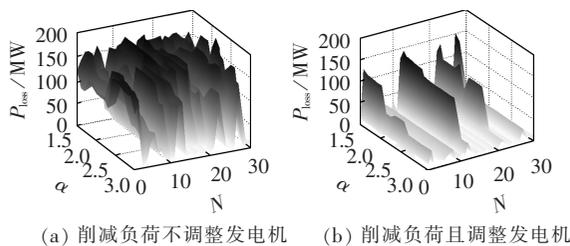


图 4 负荷情况 1 中逐个移除节点后失负荷量随 α 变化情况

Fig.4 Variation of load loss along with α when nodes removed one by one for load condition 1

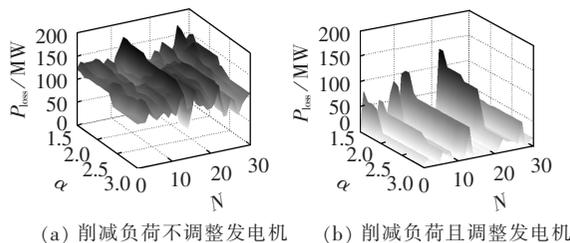


图 5 负荷情况 2 中逐个移除节点后失负荷量随 α 变化情况

Fig.5 Variation of load loss along with α when nodes removed one by one for load condition 2

失负荷量超过 100 MW, 大多数都在 80 MW 以下。这表明计及发电机调节作用的校正控制可以明显减小连锁故障的失负荷规模。

由图 4 和图 5 可见, 在相同网架结构和不同负荷分布下, 图 4(a) 和 (b) 都分别比图 5(a) 和 (b) 的系统失负荷量大。这表明在连锁故障中即使采用相同的校正控制方式, 负荷分布均衡情况下系统失负荷量较小。对比图 5(a) 和图 4(b) 可见, 前者的系统失负荷量大于后者的系统失负荷量, 表明即使系统的负荷分布较均衡, 但在连锁故障中调节发电机的校正控制措施对减小系统的失负荷量起着显著的作用。

2 种负荷情况对连锁故障的影响还可用节点介数累积分布来分析。用本文方法分别对 2 种负荷情况计算节点介数累积分布, 结果如图 6 所示。

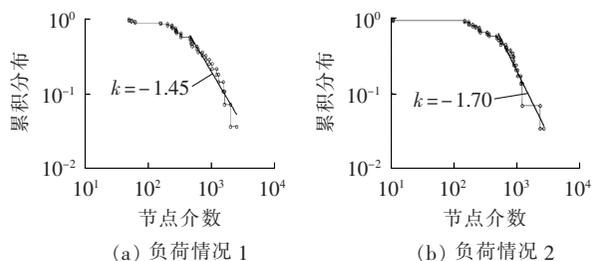


图 6 2 种情况的节点介数累积分布

Fig.6 Cumulative distribution of node betweenness for two load conditions

在图 6 中 2 种负荷情况的节点介数累积分布均表现出了幂律分布特性。运用最小二乘法对其分布尾部特性进行直线拟合得到的幂指数 k 分别为 -1.45 和 -1.70 。可见, 负荷情况 1 的节点介数累积分

布的幂指数较大, 表明节点介数分布的非均质性更强, 各节点承担的电能传输任务更不均匀。而负荷情况 2, 由于更好地就地平衡了负荷, 使跨区域供电负荷减少, 从而使节点介数累积分布的幂指数减小, 介数分布相对均匀。由于节点介数分布表现出幂律分布特性^[27]是触发大规模停电的诱因^[15], 因此负荷情况 1 比负荷情况 2 更容易发生大规模连锁故障。

综上所述, 本文建立的基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型能够较好地模拟负荷分布的变化对连锁故障的影响。

4 结论

本文针对已有基于复杂网络理论连锁故障模型的不足, 提出计及校正控制的电力系统连锁故障模型。该模型将基于潮流追踪的按比例削减负荷方法与有功网损最小的最优潮流模型相结合实现校正控制计算。由于根据导致系统潮流不收敛或安全约束不满足的负荷转移分量确定负荷削减区域, 并对其削减负荷, 因此减小了负荷削减区域和减少了负荷削减量。仿真分析表明, 在连锁故障模拟过程中实施校正控制, 可以显著减小连锁故障发生的规模。在负荷分布均匀且使用校正控制手段时, 系统发生连锁故障的规模较小。此外, 在计及校正控制后, 连锁故障发生的规模并不严格随节点裕度系数的增加而降低, 因此仅依靠提高节点裕度系数并不能在严格意义上提高电网防御连锁故障的能力。

参考文献:

- [1] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North American power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [2] 占勇, 程浩忠, 熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 93-98.
ZHAN Yong, CHENG Haozhong, XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 93-98.
- [3] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-3, 32.
LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-3, 32.
- [4] 项胜, 何怡刚, 吴可汗. 基于分形理论的国内大停电分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 367-371.
XIANG Sheng, HE Yigang, WU Kehan. Blackout analysis of domestic power based on fractal theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(Supplement 2): 367-371.
- [5] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout

- and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control,2013,41(2):19-25.
- [6] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 电力系统脆弱性理论研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):38-43.
WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun,et al. Power system vulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):38-43.
- [7] 张国华,张建华,杨京燕,等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):21-26.
ZHANG Guohua,ZHANG Jianhua,YANG Jingyan,et al. Vulnerability assessment of bulk power grid based on weighted directional graph and complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):21-26.
- [8] 刘文颖,但扬清,朱艳伟,等. 复杂电网自组织临界态辨识物理指标研究[J]. 电工技术学报,2014,29(8):274-280,288.
LIU Wenyong,DAN Yangqing,ZHU Yanwei,et al. Research on physical indicators to identify power system self-organized critical state[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):274-280,288.
- [9] KOÇ Y,WARNIER M,MIEGHEM P V,et al. The impact of the topology on cascading failures in a power grid model[J]. Physica A,Statistical Mechanics and its Applications,2014,402:169-179.
- [10] 苏慧玲,李扬. 基于电力系统复杂网络特征的线路脆弱性风险分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):101-107.
SU Huiling,LI Yang. Line vulnerability risk analysis based on complex network characteristics of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):101-107.
- [11] 李扬,苏慧玲. $N-k$ 故障下影响电力系统脆弱性的关键线路研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):60-67.
LI Yang,SU Huiling. Critical line affecting power system vulnerability under $N-k$ contingency condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):60-67.
- [12] 曹一家,王光增. 电力系统复杂性及其相关问题研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):5-10.
CAO Yijia,WANG Guangzeng. Research on power system complexity and related topics[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):5-10.
- [13] NEWMAN M E. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality [J]. Physical Review E,2001,64(1 Pt 2):132-158.
- [14] CRUCITTI P,LATORA V,MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E,2004,69(2):266-289.
- [15] 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(1-2):92-97.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术,2014,38(7):1907-1913.
WANG Tao,GAO Chengbin,GU Xueping,et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology,2014,38(7):1907-1913.
- [20] 梁才,刘文颖,但扬清,等. 输电线路的潮流介数及其在关键线路识别中的应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(8):35-40.
LIANG Cai,LIU Wenyong,DAN Yangqing,et al. Flow betweenness of transmission lines and its application in critical line identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(8):35-40.
- [21] 王韶,董光德,刘沛铮,等. 基于有功潮流介数的电力系统关键节点辨识方法:CN103259263A[P]. 2013-08-21.
- [22] 梅生伟,薛安成,张雪敏. 电力系统自组织临界特性与大电网安全[M]. 北京:清华大学出版社,2009:144-145,149.
- [23] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1996,143(4):313-320.
- [24] 幸荣霞,姚爱明,谢开贵,等. 大电网可靠性影响分析的潮流跟踪方法[J]. 电网技术,2006,30(10):54-58.
XING Rongxia,YAO Aiming,XIE Kaigui,et al. Power flow tracing method for impact analysis of large scale power grid's reliability [J]. Power System Technology,2006,30(10):54-58.
- [25] ALSAC O,STOTT B. Optimal load flow with steady state security[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1974,93(3):745-751.
- [26] FERRERO R W,SHAHIDEHPOUR S M,RAMESH V C. Transaction analysis in deregulated power systems using game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1997,12(3):1340-1347.
- [27] ALBERT R,ALBERT I,NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E,2004,69(2 Pt 2):292-313.

作者简介:



王 韶

王 韶(1956—),男,河南濮阳人,副教授,博士,从事电力系统规划与可靠性、电力系统运行与控制方面的研究工作(**E-mail**: wangshao100@163.com);

刘沛铮(1989—),男,河南新乡人,硕士研究生,从事电力系统规划与可靠性方面的研究(**E-mail**: peizheng_liu@163.com);

董光德(1987—),男,湖北黄冈人,硕士,从事电力系统规划与可靠性方面的研究(**E-mail**: 670108747@qq.com);

张煜成(1983—),男,浙江诸暨人,硕士研究生,从事电力系统规划与可靠性方面的研究(**E-mail**: cqzyc@163.com)。

Power system cascading failure model based on complex network theory, with consideration of corrective control

WANG Shao¹, LIU Peizheng¹, DONG Guangde², ZHANG Yucheng¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company
Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: In order to consider the effect of corrective control on the cascading failure model based on complex network theory, a corrective control method combining the proportional load-shedding based on the power flow tracking with the optimal power flow model based on the minimum active power loss is proposed, which adopts the power flow tracking technology to determine the load-shedding area according to the loads to be transferred in the islanded subsystem generated after the node failure and sheds the corresponding loads. With the consideration of corrective control method, a power system cascading failure model based on the complex network theory is proposed, which describes the cascading failure beyond the topology level to reflect the impact of load distribution variation on the cascading failure. The simulation for IEEE 30-bus system verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method, and the simulative results show that, the scale of cascading failure can be reduced when the loads are uniformly distributed.

Key words: complex network; node betweenness; electric power systems; cascading failure; corrective control

(上接第 161 页 continued from page 161)

PMSM initial rotor position detection and startup strategy

WANG Yaoqiang, MA Xiaoyong, CHENG Zhiping, ZHANG Zhiqiang

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An accurate method of initial rotor position detection and a strategy based on the incremental encoder are proposed to realize the smooth startup of PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). The rotor position of PMSM is pre-located according to the angle of stator current vector and the method for generating the stator current vector is deduced to acquire the accurate rotor position, according to which, a strategy of PMSM startup based on the pre-located initial rotor position is proposed. The incremental encoder is corrected during the PMSM startup. Results show that, the proposed strategy can accurately detect the initial rotor position and realize the smooth startup and reliable operation of PMSM.

Key words: PMSM; initial rotor position; startup strategy; encoder correction