

基于节点供电效能指标的电源接入方案研究

近年来国内外发生了多起大停电事故,对复杂系统理论的研究引起学术界和工程界的关注。如何将复杂系统研究的理论成果应用于指导电力系统规划和运行是努力的方向。此背景下,基于复杂系统理论,首先在源荷节点对间的实际有功潮流的基础上,提出了可以确定电源接入优选位置的节点供电效能指标;其次提出适用于电力系统的基尼系数,与平均停电规模指标相比,其可以快速定性判定新增电源节点的数目和容量对电力系统发生大规模停电的风险影响,且验证了节点供电效能指标的有效性。最后以IEEE 39和IEEE 118系统的算例验证了方法的合理性。

沈 键 丁 明 张晶晶/合肥工业大学电气与自动化工程学院
何 剑 易 俊/中国电力科学研究院

0 引言

近年来大停电事故频发,从其发展过程来看,大部分都可以概括为:系统某一元件故障,继而引发其他元件故障,最终系统潮流超过其所能承受的临界值,即系统进入自组织临界,导致大停电的发生^[1-2]。作为最复杂系统之一的电力系统,其自组织临界特性已成为现阶段理论研究的热点^[3-4]。

文献[5]引入效用风险熵理论,构建复杂电网连锁故障脆弱性评估模型,可有效反映脆弱支路对电网均匀性以及电网结构脆弱度的影响。文献[6]探讨了电网自组织临界性与电网结构均匀程度的关系,指出电网结构越均匀,系统进入自组织临界状态的风险越小。文献[7]提出电气介数的概念,重新定义源荷间潮流路径,克服了以往介数模型按照最短

路径来确定源荷间的电气距离,且可有效识别对系统脆弱性影响较大的元件。文献[8]基于电网拓扑结构和运行状态两个方面提出综合脆弱度模型,可基于系统不同状态变量辨识系统的薄弱环节。

以上各类指标都是从复杂网络介数指标的角度去辨识系统的脆弱元件和环节,辨识脆弱元件之后,没有继续考虑如何降低脆弱元件的脆弱性,减小系统发生故障的风险。

文献[9]指出电网薄弱环节是由于电网不均匀所导致,且电网不均匀可以表现为电网结构不均匀、电源负荷布点不均匀以及线路潮流不均匀等,而线路潮流不均匀则是由线路结构不均匀、电源负荷布点不均匀所共同决定的,是电网不均匀的直接表现。

在输电网中合理地加入电源,能够缩短源荷之间的电气距离,减少潮流的大规模远距离传输、源荷间的长程连接,同时减小线路潮流的不均匀性^[10]。

为此,本文从提高系统可靠性、均衡线路潮流以及避免大停电事故的角度研究了新增电源接入输电网方案,提出了基于潮流追踪理论的节点供电效能指标,并通过这一指标确定加入电源的节点位置,且引入基尼系数对电力系统线路潮流的均衡性进行快速评估,验证节点供电效能指标的有效性。算例使用OPA模型对IEEE 39节点及IEEE 118节点进行仿真,验证了本文所提方法的合理性。

1 节点供电效能指标定义

由网络系统全局效能^[11]推导出的节



沈 键/硕士研究生

关键词/Keywords

电源接入·
优选位置·
节点供电效能指标·
基尼系数·

国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG024-2012),安徽省自然科学基金项目(1408085ME100)。

点效率值 E_i 表达式为

$$E_i = \frac{1}{N_G} \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中, N_G 为发电机节点数目; d_{ij} 为负荷节点 i 与发电节点 j 之间的最短距离, 负荷节点离发电节点电气距离越小, 其节点效率值越高。

在节点效率值的基础上, 文献[12]提出了节点供电效率指标, 即

$$E_i = \frac{1}{P_{di} N_G} \sum_{j \in V_g} \frac{P_{gj}}{2^{d_{ij}-1}} \quad (2)$$

式中, P_{di} , P_{gj} 分别是负荷节点 i 的有功负荷量和发电节点 j 的有功发电量; V_g 为发电节点集合。

此节点供电效率指标虽然考虑了各个发电机的发电效能, 但是其在处理各发电机对负荷节点的供电效能上处理较为简略。在电力网络中, 负荷节点所受功率不仅与距发电节点的电气距离相关, 还与发电节点的发电容量有关系。若直接用这一公式对节点的供电效率值进行计算, 与实际相差较大。

基于以上考虑, 本文在评估节点供电效率值时, 考虑各发电节点对负荷节点 i 的实际功率供应量, 将式(1)修正为

$$E_i = \frac{1}{N_G} \sum_{j \in V_g} \frac{P_{gji}}{P_{di}} \times \frac{1}{D_{ij}} \quad (3)$$

式中, V_g 为实际电网中对负荷节点 i 供应有功功率的发电节点集合; P_{gji} 为发电节点 j 对负荷节点 i 的实际有功功率供应值; P_{di} 为负荷节点 i 的有功负荷量; P_{gji}/P_{di} 为发电节点 j 对负荷节点 i 输电能力占有所有发电节点对负荷节点 i 输电能力的比重, 发电节点 j 对负荷节点 i 输电能力占的节点负荷比重越大, 其值越大, 反映此源荷节点对的输电能力对负荷节点供电效率越重要; D_{ij} 为发电节点 j 与负荷节点 i 之间的电气距离。

式中的 P_{gji} 采用潮流追踪^[13]算法计算, 即

$$P_{gji} = \frac{P_{di}}{P_i} [A_u^{-1}]_{ij} P_{Gj} \quad (4)$$

式中, A_u 为逆序分配矩阵; P_i 为负荷节点 i 的有功潮流量; P_{Gj} 为发电节点 j 的有功功率。

考虑到每个负荷节点所带负荷大小不同, 负

荷节点所带负荷越大, 其在电力网络中越重要, 本文对式(3)定义的节点效率指标进行进一步改进, 提出节点效能指标为

$$T_i = \frac{P_{Di}}{P_z} E_i \quad (5)$$

式中, T_i 为节点供电效能; P_z 为电力网络中所有有功负荷总和; P_{Di}/P_z 为节点 i 负荷占总负荷节点中的比重。

节点供电效率相同的节点, 负荷越大, 其在供电网络中也更重要。节点供电效能值越大, 表明源荷节点之间的电气距离越小, 源荷间供电效率越大, 在供电网络中也越重要。

2 停电事故指标

2.1 潮流均匀性指标

基尼系数来源于经济学, 用来反映居民收入分配差异状况的指标。系数值越大, 表示分配越不公平, 指标差异越大; 反之分配越公平, 指标差异越小。熵来源于热力学, 是用来表征系统混乱和无序状态的一种度量值。熵值越大, 其无序程度越高, 指标值越平均; 反之, 有序程度越高, 熵值越小, 指标值越不平均。熵值已大量应用于电网中无序的度量, 如风险熵、潮流熵^[14]等。

基尼系数和熵值都可以表征系统的无序混乱状态, 都是通过表征系统状态指标值的差异程度来反映其分配公平度的。文献[15]通过算例表明: 相较于熵值, 基尼系数在公平指数测量中更能够准确反映分配公平程度。复杂网络中, 文献[16]通过引入基尼系数来表征系统结构的异构性。

电力网络按照拓扑有权网络建模原则^[17]抽象为复杂拓扑网络, 构建直流潮流计算模型。将拓扑网络中 M 条线路的初始负荷率 η 按照数值的大小排序。横坐标为第 i 条线路的排序号/线路总数, 即 i/N , 纵坐标为线路 i 累积负荷率值与总的线路负荷率值的比值, 即 W_i 为

$$W_i = \sum_{p=1}^i \eta p / \sum_{q=1}^M \eta q \quad (6)$$

据此, 可以绘出复杂网络的洛伦兹曲线, 如

图1所示。

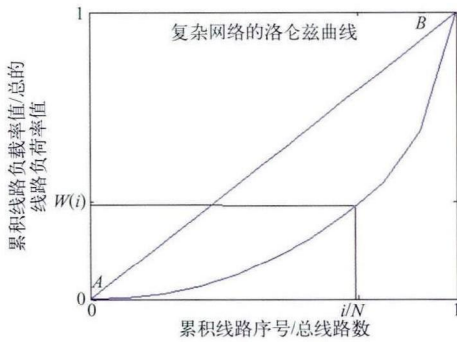


图1 复杂网络的洛伦兹曲线

采用文献[18]的方法计算基尼系数 G

$$G = 1 - \frac{1}{M} \left(2 \sum_{i=1}^{M-1} W_i + 1 \right) \quad (7)$$

在实际电网中合理加入电源，可以使总体线路潮流负荷率减少。线路潮流负荷率均匀程度相同时，总的线路负荷率越低，线路发生故障风险的概率也越低。因此，本文对基尼系数进行改造，即

$$P = C \eta_{\Sigma}^2 G \quad (8)$$

式中， C 为常数； η_{Σ} 系统总线路的负荷率。

改造后的基尼系数 P 是系统总线路潮流状况的统计衡量指标，它反映了系统各线路负荷率的分布状况，衡量系统线路潮流是否均匀，而线路潮流是否均匀对线路的脆弱性具有直接影响。所以，引入基尼系数作为衡量电力系统线路均衡性的指标具有一定意义。

2.2 停电规模表征

引入故障失负荷数^[19]作为停电规模的量值。

n 天的平均停电规模为

$$V_N = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L_{zi} - L_i}{L_{zi}}}{n} \times 100\% \quad (9)$$

式中， V_N 为 n 天的平均停电规模； L_i 为在第 i 天电力系统电网实际负荷量的大小； L_{zi} 为第 i 天电力系统网络未发生故障时的负荷量。

负荷数 L 满足

$$L = \max \left(\sum_{i \in \text{Load}} L_i \right) \quad (10)$$

$$\begin{cases} F = AP \\ 0 \leq P_{Gj} \leq P_{Gj\max} \quad (j \in \text{Gen}) \\ L_{i\max} \leq L_i \leq 0 \quad (i \in \text{Load}) \\ -F_{k\max} \leq F_k \leq F_{k\max} \quad (k \in 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (11)$$

式中， L_i 为节点 i 损失的负荷； F 为线路的潮流流量矩阵； A 为灵敏度矩阵，由电网导纳矩阵计算得到； P 为节点注入有功负荷矩阵； P_{Gj} 为发电节点 j 的实际有功发电量； $P_{Gj\max}$ 为发电节点 j 最大的有功发电量； L_i 为负荷节点的实际有功负荷需求； $L_{i\max}$ 为负荷节点的最大负荷需求； F_k 为线路 k 的线路有功潮流量； $F_{k\max}$ 为线路 k 的最大允许有功潮流量。

3 算例验证

以IEEE 39节点系统为例进行模型仿真，系统接线如图2所示。

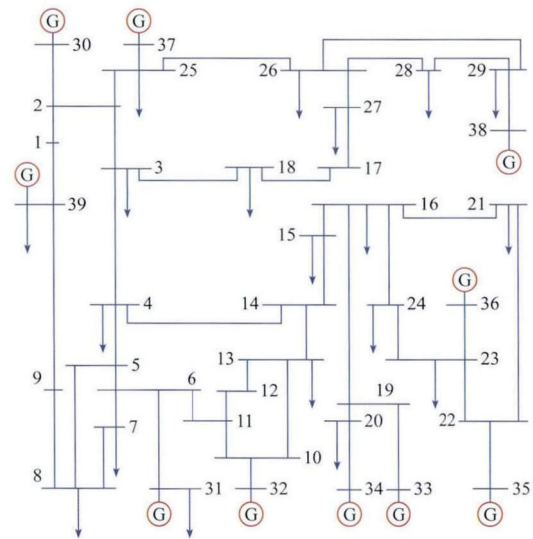


图2 IEEE 39节点系统接线

3.1 节点供电效率指标有效性的验证

为了方便说明，引入重负荷模型（方案1）、电气介数节点模型（方案2）以及电网状态与结构加权模型（方案3）与本文所述模型进行对比。本文方案是根据式（5）得出的节点供电效能指标，选取节点供电效能指标最小的5个节点。方案1是选取系统中负荷最大的5个节点；方案2选取的是电气介数最大的前5个节点，方案3选取的是电网

状态与结构指标最大的前5个节点。试验一、试验二是分别在各模型中选出的节点集平均加入总有功功率为电网发电机总出力10%和20%的新增电源，负荷节点上的有功负荷量也相应按其比重等比例增加10%和20%。原电网则是所有负荷节点上的有功负荷量，发电节点上的有功功率量按比例增加10%或者20%。由各方案计算出的基尼系数如表1所示。

表1 不同新增电源比例下的各方案基尼系数

各模型	原电网	本文方案	方案1	方案2	方案3
试验一（10%）	0.372	0.298	0.302	0.312	0.307
试验二（20%）	0.440	0.291	0.295	0.322	0.313

从表1可看出，试验一、试验二中原电网的线路潮流基尼系数较高，所有方案都有一定程度下降，且本文方案的基尼系数较其他所有方案都小，表明本方案输电网络的线路潮流更加均衡。试验二中本文方案的基尼系数比试验一的基尼系数小，表明在IEEE 39节点系统中，新增电源比例为20%的方案更能使输电网络线路潮流均衡。线路潮流越均衡，系统发生大停电事故的风险越小。

采用直流潮流OPA模型^[20]， $\alpha = 0.7$ ， $\beta = 0.3$ ， $\lambda = 1.000\ 5$ ， $\mu = 1.003$ ， $\gamma = 1$ 。对各方案进行仿真验证研究，选用仿真前2 000天的平均停电规模进行评估，评估结果如表2所示。

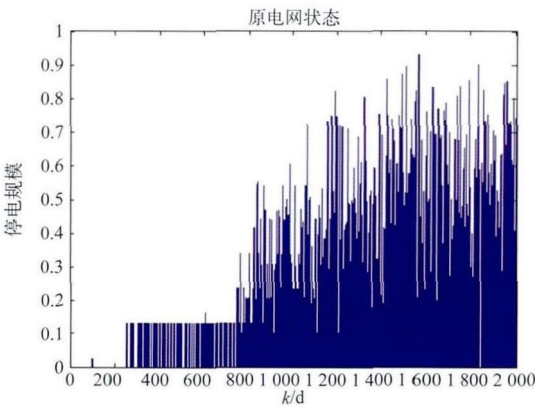
表2 不同新增电源比例下各模型的前2 000天平均停电规模
(单位：%)

各模型	原电网	本文方案	方案1	方案2	方案3
试验一（10%）	9.33	6.44	6.68	6.94	6.71
试验二（20%）	11.37	6.01	6.28	6.91	6.30

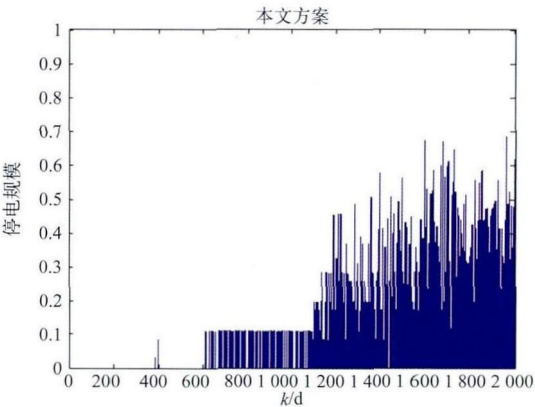
从表2中可以看出：试验一、试验二中原电网在仿真中前2 000天平均停电规模分别为0.093 3、0.113 7，表明其平均停电规模较大。其他四种方案平均停电规模都出现不同程度的下降，其中试验一中，本文方案较其他三种方案分别下降3.7%、7.8%和4.0%；试验二中，本文方案较之分别下降4.5%、15%和4.8%。试验二中本文方案的2 000天平均停电规模比试验一的平均停电规模小，与表1中各方案的基尼系数变化趋势基本保持一致，表明基尼系数可以用来判断电力系统发生

大停电故障的风险。

对比原电网状态和本文方案在OPA模型仿真2 000天停电规模，仿真结果如图3所示。



(a) 原电网在OPA模型仿真2 000天的停电规模



(b) 原电网中采用本文方案在OPA模型仿真2 000天的停电规模

图3 不同方案下OPA模型仿真结果

从图3a、b可以明显看出：在OPA模型仿真前2 000天中，原电网状态下在280天左右开始出现大停电事故，且在900天之后系统故障发生概率陡然增多，停电规模也越来越大；本文方案在600天左右开始出现大停电事故，且在1 200天以后系统故障发生概率增多，停电规模增大。相较于原电网状态下，本文方案明显地推迟了发生停电事故和进入自组织临界的时间，并且停电频率和停电规模都较原电网有明显的改善。

IEEE 39系统中分别加入新增电源容量占总总有功率容量的10%和20%，各策略负荷节点供电效能指标中前10位节点的影响排序对比如表3所示。其中，策略1为原电网按照初始状态等比例增加总有功率10%容量；策略2为在根据本文方案选取

的5个负荷节点上等量加入有功功率占总有功功率容量10%的电源；策略3为原电网按照初始状态等比例增加总有功功率20%容量；策略4为在根据本文方案选取的5个负荷节点上等量加入有功功率占总有功功率容量20%的电源。

表3 各策略对节点供电效能值的影响排序对比

排序	策略1		策略2		策略3		策略4	
	节点	供电效率值	节点	供电效率值	节点	供电效率值	节点	供电效率值
1	9	0.09	26	0.44	9	0.10	39	3.02
2	12	0.09	39	1.90	12	0.10	18	3.13
3	39	1.23	18	3.03	39	1.33	24	6.37
4	1	1.63	27	3.52	1	1.77	7	7.03
5	26	2.05	24	5.57	26	2.23	27	7.36
6	18	3.15	7	6.82	18	3.43	15	7.43
7	27	3.58	15	7.11	27	3.89	28	7.99
8	24	5.55	28	7.35	24	6.03	3	9.70
9	7	7.19	3	9.15	7	7.82	16	10.6
10	15	7.32	16	9.79	15	7.95	23	10.9

从表3中可以看出，策略2中各节点供电效率值较策略1中的数值大一些，策略4中各节点供电效率值较策略3中大一些，且策略2和策略4中前10位节点的供电效率值的平均值也比策略1和策略3大。根据式（3）可知，节点供电效率值越大，其源荷节点之间的电气距离越近。按本文方案进行新增电源容量的节点位置选择，可以提升网络整体的供电效率，缩短源荷节点之间的电气距离，减少潮流的大规模远距离传输，同时减小源荷间的远程连接。

图4为20%新增电源比例各方案平均500天的停电规模对比。由表1可知，本文方案的基尼系数小于其他方案，且原方案的基尼系数最大。从图4可知，原电网的平均停电规模要远高于其他方案的平均停电规模。其中本文方案较其他三种方案在平均停电规模上较小，表明本文方案相较于其他方案在新增电源节点的选址上具有优选性。

3.2 电源的接入点数目对系统影响

通过供电效能指标得到供电效率值最小的节点数集，所选节点加入的电源占系统总有功容量的10%或20%。进行OPA模型的仿真，仿真时间为

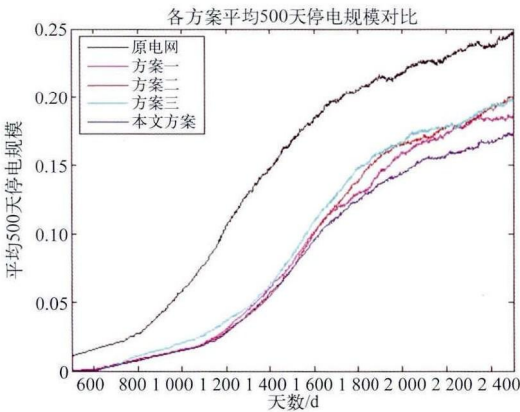


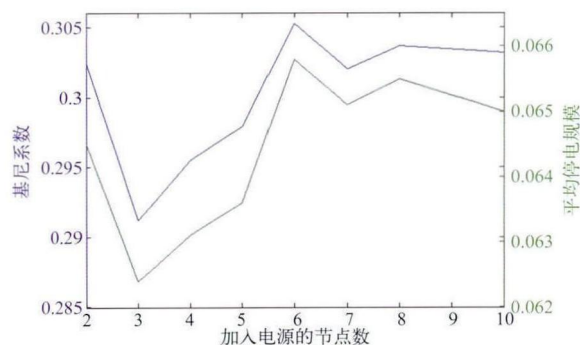
图4 20%新增电源比例各方案平均500天停电规模对比

2 000天。IEEE 39系统由9个发电节点、20个负荷节点、10个传输节点及46条功率传输线路组成。IEEE 118系统由15个发电节点、93个负荷节点、10个传输节点及186条功率传输线路组成。

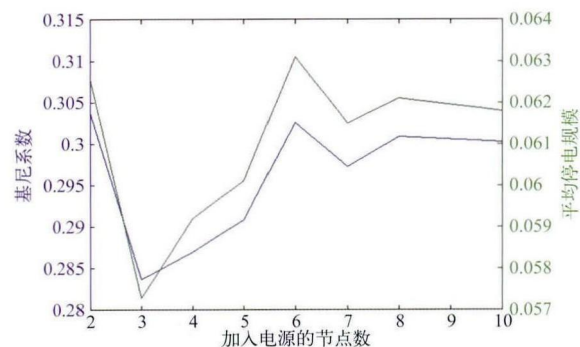
系统加入电源节点数对系统的影响如图5所示。图5a为新增电源容量占总有功功率容量为10%时加入电源节点数对IEEE 39节点系统的影响；图5b为新增电源容量占总有功功率容量为20%时加入电源节点数对IEEE 39节点系统的影响；图5c为新增电源容量占总有功功率容量为10%时加入电源节点数对IEEE 118节点系统的影响；图5d为新增电源容量占总有功功率容量为20%时加入电源节点数对IEEE 118节点系统的影响。

从图5a~d中可以看出，同一电力系统IEEE 39节点系统下新增电源容量占总有功功率比例不同，又或是新增电源容量占总有功功率比例相同时，不同电力系统（IEEE 39、IEEE 118节点系统）在加入不同数目电源节点后，系统的基尼系数与OPA仿真中的前2 000天的平均停电规模保持相同的趋势。而图5a、b和图5c、d显示同一电力系统（IEEE 39节点系统或IEEE 118节点系统）加入不同容量的新增电源后，对应系统加入不同数目电源节点，基尼系数和平均停电规模都保持一定的相似性。因此，新增电源容量相同时，无论是IEEE 39节点系统还是IEEE 118节点系统，在少数重要节点集加入新增电源后可以有效降低系统的基尼系数和平均停电规模。

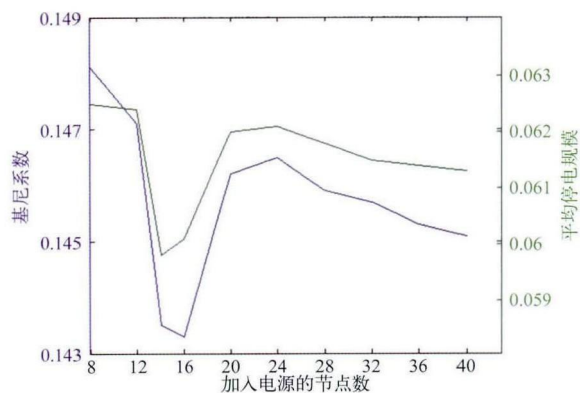
在电力网络中，加入不同的电源节点数，



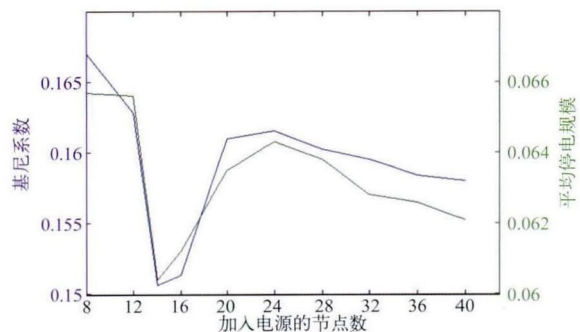
(a) 新增电源容量占总无功功率容量为10%时, 加入电源节点数对IEEE 39节点系统的影响



(b) 新增电源容量占总无功功率容量为20%时, 加入电源节点数对IEEE 39节点系统的影响



(c) 新增电源容量占总无功功率容量为10%时, 加入电源节点数对IEEE 118节点系统的影响



(d) 新增电源容量占总无功功率容量为20%时, 加入电源节点数对IEEE 118节点系统的影响

图5 系统加入电源节点数对系统的影响

对系统发生大停电事故的风险具有很大的影响。IEEE 39系统中, 加入新增电源3~5个节点, 系统基尼系数较小, 平均故障规模较小。IEEE 118系统中, 加入新增电源14~18个节点, 系统基尼系数较小, 平均故障规模也相对较小。由此可以看出, 电源加入的节点数需要考虑实际系统的节点规模, 较少或较多的电源节点都会导致系统的基尼系数变大。通过仿真可以得出, 存在一个加入电源的节点数集可以使系统的基尼系数相对较小, 此时系统负荷率较低, 且系统线路潮流较均匀, 但合适的节点数量计算方法有待进行进一步研究。

4 结束语

本文提出了节点供电效能指标, 其能够有效地判定出加入电源的优选位置, 并探讨了电力网络中加入电源的节点数量对电力网络的影响。同时提出适用于电力系统的基尼系数, 用来判定电力网络线路潮流的不均衡性, 且进一步验证节点供电效能指标的有效性, 所得结果具有参考意义。

需要指出的是, 电力网络还需要考虑无功就地补偿因素、电压稳定的影响以及电源定容问题, 在后续研究工作中将讨论这些因素对电源选址问题的影响。

参考文献

- [1] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 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.
- [2] 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.
- [3] Tu Jingzhe, Xin Huanhai. On self-organized criticality of the east China AC-DC power system – the role of DC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013(28): 3204-3214.
- [4] Duan Xianzhong, Su Sheng. Self-organized criticality in time series of power systems fault,

- its mechanism, and potential application [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010 (25) : 1857-1864.
- [5] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (17) : 51-57.
- [6] 梁才, 刘文颖, 等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (20) : 6-11.
- [7] 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.
- [8] 魏震波, 刘俊勇, 等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8) : 11-14.
- [9] 孙伟卿, 王承民, 等. 电力系统运行均匀性分析与评估 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (4) : 173-180.
- [10] Priyanka Paliwal, N P Patidar, R K Nema. A comprehensive survey of optimization techniques used for distributed generator siting and sizing [C]. Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE, 2012: 1-7.
- [11] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (10) : 138-144.
- [12] 王莹莹, 梅生伟, 等. 基于复杂网络理论的含分布式发电的电力网络脆弱度评估 [J]. 系统科学与数学, 2010, 30 (6) : 859-868.
- [13] 刘文颖, 梁才, 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 (32) : 90-98.
- [14] 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.
- [15] 俞登科, 陈华, 郎益夫. 基尼系数和熵在公平指数测量中的比较 [J]. 统计与决策, 2012 (3) : 95-96.
- [16] 胡福年, 葛苗苗, 张访, 等. 分布式电源接入配电网的多目标伏值控制 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (3) : 41-46.
- [17] 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.
- [18] 张建华. 一种简便易用的基尼系数计算方法 [J]. 山西农业大学学报: 社会科学版, 2007, 6 (3) : 275-278.
- [19] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 用连锁故障搜索算法判别系统的自组织临界状态 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25) : 1-5.
- [20] 何飞, 梅生伟, 等. 基于直流潮流的电力系统停电分布及自组织临界性分析 [J]. 电网技术, 2006, 30 (14) : 7-12.

(收稿日期: 2015-11-12) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告