

基于准稳态功率转移分布因子的电力系统 复杂网络特性分析

苏慧玲, 李 扬

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 基于复杂网络理论及电力系统有功分布的实际特点, 并考虑发电节点和负荷节点的有功注入, 采用准稳态功率转移分布因子建立改进支路权重模型, 该模型可以从支路承担有功传送的功率大小角度反映系统节点之间的连接强度。基于此, 建立基于改进支路权重定义下的电力网络测度模型, 该模型能够从电网传送有功以及电网拓扑结构角度综合体现系统元件复杂网络特性的多样性和差异性。算例分析结果验证了所提模型的有效性和可行性。

关键词: 电力系统; 准稳态功率转移分布因子; 改进权; 复杂网络测度; 多样性; 非均匀性; 模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.009

0 引言

现代电力系统是一个复杂的人造网络系统, 包含众多电力元件来承担电能的传送功能, 以满足日益增长的电能需求。其中, 电力元件传送电能的安全性是确保整个电力系统安全可靠运行的基本前提。近年来, 世界范围内一系列连锁故障和大停电事故的频繁发生促使从系统科学的角度来分析电力系统元件的复杂网络特性, 进而研究电力系统的脆弱性, 探索连锁故障以及大停电的发生机理^[1-5]。

在复杂网络理论中, 衡量复杂网络拓扑特性的基本测度有平均距离、节点度、节点聚类系数以及介数等^[6-7]。其中, 节点度表示与该节点相连接的节点数, 聚类系数表示该节点的邻接点之间的连接关系, 介数表示源点至终点间的最短路径通过节点/边的次数。节点度和聚类系数反映节点在网络中的局部特征, 而介数则反映节点/边在网络中的全局特征。通过对复杂网络特性的分析研究, D. J. Watts 和 S. H. Strogatz 发现了复杂网络的小世界性, A. L. Barabasi 和 R. Albert 揭示了复杂网络的无标度性。大量实例研究验证了小世界性和无标度性是许多实际网络的拓扑统计共性, 这些性质既不同于规则网络, 也不同于随机网络, 而是介于规则与随机之间, 通常称为复杂网络。

在电力系统中, 不考虑节点之间的差异性以及连接边的权重, 将边权视为“1”, 即单位权网络, 采用复杂网络的基本测度研究得到, 电力网络也在一定程度上具有小世界性和无标度性的类似特点, 其中, 长程连接的存在导致了电网故障传递蔓延的可能性, 无标度性的存在使得电力系统对于具有较高连接度的

大节点的攻击表现出明显的脆弱性, 对电网的正常运行造成严重的影响^[8-10]。

电力系统网络不同于一般的物理网络, 有自身的特点。文献[10]通过考虑支路的电抗, 基于复杂网络理论, 以电网拓扑的连通性能探讨电力系统的脆弱性以及连锁故障的发生机理。文献[11]考虑电力系统的无功分布以及节点电压变化, 建立权重模型, 较全面地分析了电力系统元件的网络特性。

电力系统是一个传送电能的复杂网络, 满足供需两端的电能平衡。此外, 电力系统是一个动态的非线性系统, 而且导致电网灾难性事故往往不是单一因素作用的结果, 而是各种因素相互作用的相继的、综合的发展结果, 如功角振荡、过负荷、电压异常、频率崩溃等, 具有很大的偶然性, 但是引起这些因素的根本原因在于电力系统的潮流突变或者供需显著不平衡。在电力网络中电网远距离传输有功, 但是希望电网无功尽量减少流动, 而且避免无功的远距离流动。

因此, 本文考虑电力系统有功的分布情况, 基于准稳态功率转移分布因子, 同时考虑发电及负荷节点的有功注入影响, 建立电力系统的支路权重模型, 具有一定的实际意义。基于复杂网络理论, 建立电力系统元件的网络权重指标, 采用一系列算例来全面分析在改进模型下电力系统复杂网络特性的特点, 以获得对电力系统的复杂网络特性的认识 and 了解, 这将有助于从电力系统的复杂网络结构上进一步分析电力系统的脆弱性, 探讨电力系统连锁故障以及大停电事故的机理。

1 改进支路权重

1.1 支路权重

在电力系统中, 采用加权网络来表示电力网络节

点之间的连接强度,较单位权网络更具有实际意义。支路权重通常用节点间的电气距离来表示,然而电气距离并没有统一明确的定义,一般根据研究问题的需要灵活选择^[12]。文献[13]为研究潮流追踪损耗分摊方法,从电路等值的角度以二端网络的输入阻抗作为度量节点间电气距离的参数;文献[14]采用节点阻抗矩阵来定义电气距离对电力网络进行分区研究;文献[15]基于 GGDFs (Generalized Generation Distribution Factors) 和 TGDFs (Topological Generation Distribution Factors) 考虑发电节点至负荷节点之间的电气距离;文献[16]提出采用电源与负荷之间的等效阻抗来表示电气距离;文献[17]为研究电力系统电压/无功分区优化控制,基于电压和无功的灵敏度矩阵来建立电气距离模型,文献[11]采用该电气距离进行电力系统网络特性的分析与模型改进;文献[18-19]则将支路电抗视为连接边权重;文献[20]结合单位节点注入电流法,采用叠加原理将所有发电节点-负荷节点对的注入功率在各支路上的分配进行叠加来建立加权电气介数。

1.2 改进支路权重

电力网络是联系发电和用电的统一整体,网络传输有功的分布情况不仅与用电负荷的需求以及系统的发电分布有关,而且也与电力网络的拓扑结构有关。在电力系统分析中可以将系统的发电看作正的有功注入,将负荷看作是负的有功注入。准稳态功率转移分布因子^[21]不同于节点注入功率转移分布因子,其值不随参考节点的不同而不同,认为系统的不平衡量是由多个有功注入节点共同承担。设承担系数为 $\alpha_k (k \in \{S_{\text{Gen}}, S_{\text{Load}}\})$, 各节点注入功率在支路 l 的转移分布因子表示为向量 $\mathbf{G}_l$, 则可以得到该支路的准稳态功率转移分布因子向量 $\mathbf{G}_l^R$:

$$\sum_{k \in \{S_{\text{Gen}}, S_{\text{Load}}\}} \alpha_k = 1 \quad \alpha_k \geq 0$$

$$\mathbf{G}_l^R = \mathbf{G}_l (\mathbf{I}_K - \alpha_K \mathbf{E}_K^T) \quad l \in S_{\text{Line}} \quad (1)$$

其中, l 表示支路标号; k 表示注入节点标号; S_{Gen} 表示发电节点集; S_{Load} 表示负荷节点集; S_{Line} 表示支路集; K 表示节点注入集 $\{S_{\text{Gen}}, S_{\text{Load}}\}$ 的大小; $\mathbf{I}_K$ 表示单位对角阵; $\mathbf{E}_K$ 表示全 1 列矢量; α_K 表示 α_k 组成的列向量。

将准稳态功率转移分布因子以矩阵分量表示,如式(2)所示;采用式(3)标么化处理发电/负荷节点的有功注入,系统节点注入量满足 $\sum_{i \in S_{\text{Gen}}} P_i - \sum_{j \in S_{\text{Load}}} |P_j| = 0$ 。建立考虑节点有功注入的支路权重模型,如式(4)所示。式中考虑了所有负荷与发电以及电网拓扑结构,通过准稳态功率转移分布因子建立了节点注入与系统有功分布之间的关系。此处,将所有负荷与发

电纳入模型中,用于分析电力系统的复杂网络特性,但是可根据具体研究情况的需要灵活选择发电/负荷节点,如系统运行方式的变化、系统负荷增长的情况以及大规模风电并网注入的波动性变化等,那么,式(4)可以认为是以需要分析的发电/负荷节点的注入量为变量的支路权重模型。

$$\mathbf{G}^R = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1K} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{L1} & \cdots & g_{LK} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\rho_k = \frac{P_k}{\sum_{i \in S_{\text{Gen}}} P_i + \sum_{j \in S_{\text{Load}}} |P_j|} \quad k \in \{S_{\text{Gen}}, S_{\text{Load}}\} \quad (3)$$

$$W_l = \sum_{i \in S_{\text{Gen}}} \rho_i g_{li} + \sum_{j \in S_{\text{Load}}} \rho_j g_{lj} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{G}^R$ 表示准稳态功率转移分布因子矩阵,其矩阵组成元素为节点单位有功注入在各支路上的分配系数; L 表示支路集的大小; P_k 表示发电/负荷节点 k 的有功注入; ρ_k 表示发电/负荷节点 k 注入的标么值; W_l 表示支路 l 的改进支路权重。

此外,文中将各节点的注入以 $\sum_{i \in S_{\text{Gen}}} P_i + \sum_{j \in S_{\text{Load}}} |P_j|$ 为基准功率进行了标么化。对于不同规模的电力系统网络,除了所含元件的数量及物理参数不同而导致的 $\mathbf{G}^R$ 不同外,明显的区别就是系统的传输容量不同。那么,式(4)中的标么化处理可以有助于研究不同规模电力系统在网络特性上的共性与特性,获得对电力系统复杂网络特性的全面认识,以便进一步从电力系统的复杂网络特性上来探索电力系统的一系列问题,如电力系统的脆弱性、连锁故障等灾难性故障。

在此,采用图 1 所示 3 节点算例^[21]以说明改进支路权重的有效性,图中数据为有功标么值。基本参数及计算结果见表 1,表中支路阻抗与支路有功为标么值。由表 1 可知,各支路的单位权只能反映节点之间的连接关系,各支路的电抗权之间的比例关系为 4:4:1:2,各支路的改进支路权为 3:3:14:1,由各支路有功分布大小得到的改进权较电抗权更能反映支路有功潮流的分布情况。

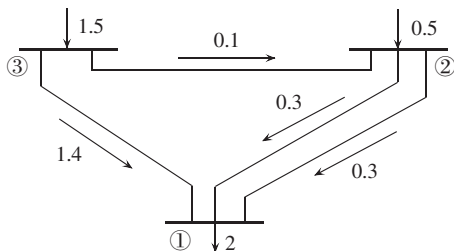


图 1 3 母线电力系统的支路潮流分布
Fig.1 Branch power flow distribution of 3-bus power system

表 1 不同边权定义下的支路权值
Tab.1 Branch weight under different edge weight definitions

支路标号	支路阻抗	支路有功	改进权	单位权	电抗权
①-②	0.4	-0.3	-0.075	1	0.4
①-②	0.4	-0.3	-0.075	1	0.4
①-③	0.1	-1.4	-0.350	1	0.1
②-③	0.2	-0.1	-0.025	1	0.2

2 电力网络测度

从电力系统的复杂网络结构角度来重新认识电力系统的电气特性是电力研究者关注的重点之一。已有电力网络测度模型试图从模拟电力系统潮流的实际分布特点来考虑,但是仍存在不足之处,侧重从元件在电力网络拓扑结构中的重要性去考虑,忽略了元件在系统中承载有功传输的重要性。

以图 2 所示简化电力系统拓扑结构为例,其中 Area 表示省略的网络拓扑部分,并认为节点 1 和节点 2 之间所连变压器为支路。从电力网络拓扑结构上来看,节点 1、节点 2 以及支路 1-2 在整个网络结构中可能并不重要,但是从系统传输容量来看,如果节点 1 所连发电机的出力相对系统发电容量而言较大,则节点 1、节点 2 以及支路 1-2 在整个系统功率传输的过程中就较为重要,一旦某一元件因故障退出,则将对系统有功分布情况甚至供电需求造成严重的影响。因此,采用复杂网络理论对电力系统的电气特性进行研究需要考虑元件的有功传输作用。

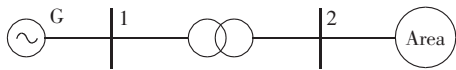


图 2 电力系统简化拓扑结构

Fig.2 Simplified topological structure of power system

本文通过改进支路权重的方法,结合复杂网络理论的加权网络测度^[22]来建立电力网络测度:介数、节点度以及聚类系数。

a. 介数。

该测度是用来描述元件在网络中能量传输的重要性。改进支路权重模型能够反映支路在功率传输过程中的重要性。采用改进支路权参数,建立支路介数模型如式(5)所示。

$$B_l=\frac{|W_l|}{\sum_{l\in S_{Line}}|W_l|} \tag{5}$$

建立节点介数模型如式(6)所示。

$$W_i=\max\left(\sum_{l\in S_{Out},W_l>0}|W_l|,\sum_{l\in S_{In},W_l<0}|W_l|\right) \tag{6}$$

$$B_i=\frac{W_i}{\sum_{i\in S_{Node}}W_i}$$

其中, l 表示支路标号; B_l 表示支路介数; S_{Line} 表示支

路集; i 表示节点标号; W_i 表示节点权重; S_{Conn} 表示与节点 i 相连支路标号集; S_{Node} 表示系统网络的节点集。

b. 节点度。

在复杂网络中,节点度用于表示与该节点相连的节点数,考虑边权的加权节点度数学模型如式(7)所示。

$$S(i)=\sum_{j\in S_{Conn}}a_{ij}|W_{ij}| \tag{7}$$

其中, W_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间支路的权重; a_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的连接边情况,若为 1,表示节点 i 和节点 j 之间有连接边,若为 0,表示无连接边。

这里建立改进节点度模型如式(8)所示。

$$S'(i)=\frac{W_i}{\max(W_i)}\frac{S(i)}{\max(S(i))} \tag{8}$$

c. 聚类系数。

节点的聚类系数用于表示该节点与邻接点之间的连接关系。加权聚类系数不仅考虑了节点 i 的邻接点数,而且也能反映邻接点之间连接的紧密程度,模型如式(9)所示。

$$C(i)=\frac{\sum_{j,k\in S_{Neighbor}}|W_{ij}W_{jk}W_{ki}|}{(\max|W_{ij}|)\sum_{j,k\in S_{Neighbor}}|W_{ij}W_{ki}|} \tag{9}$$

其中, $S_{Neighbor}$ 表示节点 i 的邻接点集合。

3 电网拓扑特性分析

本文采用不同规模的 IEEE 标准算例^[23]分析说明,算例基本数据如表 2 所示,其中对于既有发电注入又有负荷注入的节点,该节点的注入取两者差值。

表 2 算例基本数据

Tab.2 Basic data for case analysis

算例	节点数	边数	系统负荷 / MW
case 14	14	20	237.3
case 30	30	41	164.3
case 39	39	46	5245
case 57	57	80	695.8
case 118	118	186	3650
case 300	300	411	20815

表 3 所示为改进边权下的电力网络测度平均值。可以看出,各算例的节点权的平均值要大于对应算例的边权的平均值,即在电力网络中节点的重要性要高

表 3 改进边权下的电力网络测度平均值

Tab.3 Average of electrical network measurement with improved branch weight

算例	W_l	W_i	B_l	B_i	S'	C
case 14	0.0662	0.1335	0.0500	0.0714	0.1787	0.0979
case 30	0.0265	0.0529	0.0244	0.0333	0.1551	0.0714
case 39	0.0274	0.0528	0.0217	0.0256	0.1739	0.0099
case 57	0.0172	0.0371	0.0125	0.0175	0.0584	0.0088
case 118	0.0068	0.0161	0.0054	0.0085	0.0580	0.0132
case 300	0.0032	0.0067	0.0024	0.0033	0.0528	0.0056

于边的重要性,并且基于改进权定义的边/节点介数也能反映这一特点,这与电力系统的实际特点是一致的。

此外,由各算例的边权的平均值可发现,case 14 的边权的平均值最大,case 300 的边权的平均值最小。由表 2 可知,case 30 包含的边数要远大于 case 14 的边数。通常,在小规模电力系统中,发电端至负荷端的距离较近,系统包含的元件较少,而在大规模电力系统中,发电端至负荷端的距离较远,系统包含的元件较多,并且小规模系统的发电端和负荷端相对较为集中,网络结构相对简单,而大规模系统的发电端和负荷端较为分散,网络结构相对复杂。基于改进边权的定义,可以假定系统含 N 个发电机点, M 个负荷点,并且满足式(10),即认为系统总的负荷需求为单位 1,总的发电量为单位 1,将电力系统进行简化,如图 3 所示,图中 P_{Gen}^i 和 P_{Load}^i 分别表示发电节点和负荷节点的有功注入。单位发电 1 经过电力网络传输至负荷端,那么如果电力网络所含的元件越少,各元件在功率传送过程中所占的功率传输比例越大,反之,各元件在功率传送过程中所占的功率传输比例越小。

$$\sum_{i=1}^N r_{\text{Gen}}^i = \sum_{j=1}^M r_{\text{Load}}^j = 1 \tag{10}$$

其中, r_{Gen}^i 表示发电节点 i 的发电比例; r_{Load}^j 表示负荷节点 j 的负荷比例。

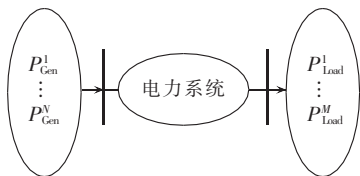


图 3 电力系统的简化示意图

Fig.3 Schematic diagram of simplified power system

3.1 电力网络测度的分布

为进一步探索电力网络测度的分布情况,本文采用 Pareto 累积分布来统计各测度的变化规律,如式(11)所示。

$$P(x_j \geq x_i) = \frac{\sum_{j=i}^N n(x_j \geq x_i)}{N} \tag{11}$$

其中, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 表示某项电力网络测度的取值; n 表示某项电力网络测度值中 $x_j \geq x_i$ 的个数。

图 4 所示为各算例的边权累积概率分布情况。从图中可知,电力系统的边权值具有高度的非均匀性,仅有小部分的边权值较大,而大部分的边权值较小,如在 case 300 中,系统仅有 10% 的边权值较大。

采用单对数分布图来表示边权的累积概率分布情况,如图 5 所示,直观上来看,各算例的分布情况

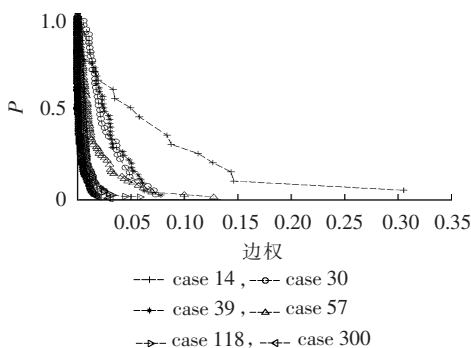


图 4 边权的累积概率分布图

Fig.4 Cumulative probability distribution of branch weight

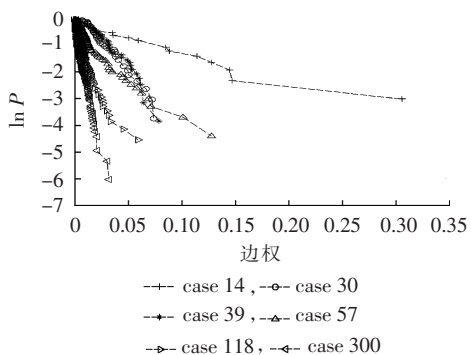


图 5 边权的累积概率的单对数分布图

Fig.5 Single logarithmic distribution of cumulative probability of branch weight

近似直线分布,即近似符合指数分布。但是分别采用指数模型式(12)和漂移幂律模型式(13)进行拟合,均能取得较好的拟合结果,拟合参数见表 4。其中,case 14、case 57 和 case 300 的漂移幂律拟合结果优于指数模型的拟合结果,而其余算例则是指数模型的拟合结果较优。

$$P(x) \propto e^{-\gamma x} \tag{12}$$

$$P(x) \propto (x+a)^{-\gamma} \tag{13}$$

表 4 边权累积概率分布拟合结果

Tab.4 Fitted cumulative probability distribution of branch weight

分布函数	参数	case 14	case 30	case 39	case 57	case 118	case 300
漂移	a	0.153	1.366	1.461	0.026	1.025	0.002
幂律	γ	2.65	55.77	45.05	2.453	173.7	1.331
指数	γ	13.26	40.31	30.42	72.56	168.9	381.3

因此,从拟合分布规律的角度来讲,很难精确地判断是属于幂律分布还是指数分布,但是由图 4 和图 6 中边/节点权的累积概率分布可以确定电力系统的边权分布具有高度的非均匀性。那么,由式(5)和式(6)可得,基于边权的介数也具有类似的分布特性。介数反映的是元件在电能从源端至终端传送过程中承载的作用大小,是一个全局量,可以用来反映元件在网络中的重要性。由其非均匀性可知,电力系

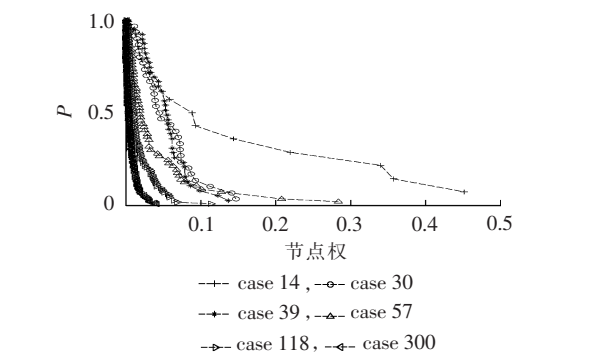


图 6 节点权的累积概率分布图
Fig.6 Cumulative probability distribution of node weight

统网络虽包含众多元件,但仅有小部分的元件在网络功率传送过程中承担重要的作用。利用该特点能够从电力系统的众多元件中快速辨识重要元件。

图 7 所示为节点度的累积概率分布。图 7(a)为单位权定义下的节点度的累积概率分布,由图可知,各算例中节点度值大于 5 的概率约 20%,大部分节点的连接边数较少,约 50% 的节点的连接边数小于 3。从节点加权度的累积概率分布情况可知,电力网络中仅约 10% 的节点承担重要的功率传送作用,并且约 20% 的节点加权度值明显较大,其中 case 57、case 118 和 case 300 表现较明显。

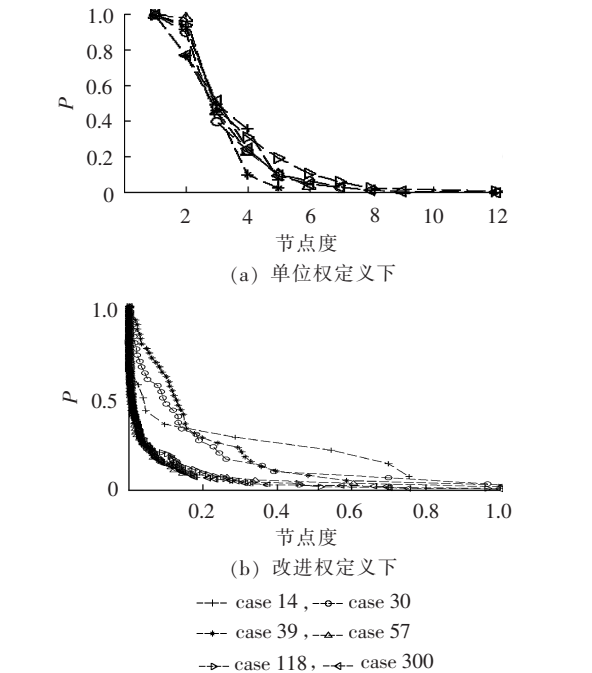


图 7 节点度的累积概率分布
Fig.7 Cumulative probability distribution of node degree

图 8 所示为聚类系数的累积概率分布。由图可知,case 14 系统各节点的邻接点之间连接最为紧密,case 39 系统各节点的邻接点之间连接最为松散。其中,case 300 系统 75% 左右的节点的邻接点之间不存在连接,对于 case 57 系统和 case 118 系统这一比例近似为 65%。相对而言,小规模系统包含较少元件,

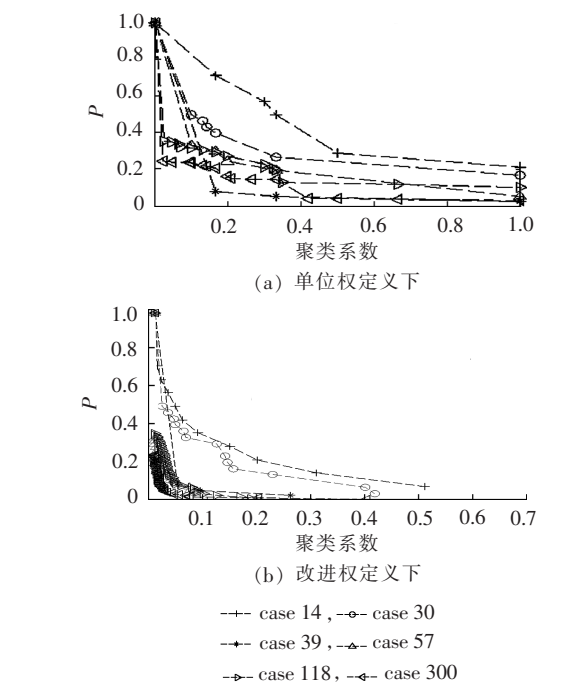


图 8 聚类系数的累积概率分布
Fig.8 Cumulative probability distribution of cluster coefficient

但元件之间的连接较为紧密,而大规模系统包含较大元件,元件之间存在联系,但大部分元件之间的连接关系较为松散。

从电力网络测度的分布分析可知,系统的电力网络测度具有高度的非均匀性,存在小部分元件的电力网络测度值较大,而大部分元件具有较低的网络测度值。此外,介数测度反映的是元件在系统中的全局特征,节点度和聚类系数则反映的是元件在系统中的局部特征。那么利用电力网络测度的非均匀性分布特点,采用电力网络测度有助于从系统的全局和局部来研究元件对系统安全可靠传送电能的影响。

3.2 改进权网络与电抗权网络的网络特性对比

这里采用 case 39 来分析,数据结果如表 5 和表 6 所示。表中将改进权网络中的节点/边介数测度由大至小排序并取较大值部分。

表 5 case 39 节点网络测度					
Tab.5 Network node measurements of case 39					
序号	节点号	改进权		电抗权	
		B_i	C	S	B_i
1	6	0.0663	0	4	31
2	10	0.0594	0	3	30
3	16	0.0480	0	5	106
4	23	0.0417	0	3	28
5	5	0.0401	0	3	29
6	2	0.0382	0	4	54
7	29	0.0379	0.3333	3	28
8	38	0.0379	0	1	20
9	19	0.0370	0	3	46
10	22	0.0316	0	3	45

表 6 case 39 支路网络测度
Tab.6 Network branch measurements of case 39

序号	支路号	改进权		电抗权	
		B_l	始端点 B_l	末端点 B_l	B_l
1	29-38	0.0621	0.0379	0.0379	20
2	6-31	0.0500	0.0663	0.0306	20
3	10-32	0.0487	0.0594	0.0297	20
4	22-35	0.0487	0.0316	0.0297	20
5	19-33	0.0473	0.0370	0.0289	20
6	21-22	0.0455	0.0278	0.0316	44
7	23-36	0.0419	0.0417	0.0256	20
8	25-37	0.0404	0.0273	0.0247	20
9	5-6	0.0402	0.0401	0.0663	18
10	20-34	0.0380	0.0232	0.0232	20

由表 5 可知,由于改进权网络考虑了节点之间连接边的传送有功能力,能够反映连接强度的多样性,增加了对网络的描述能力,而在电抗权网络中,如节点介数,虽然能够在网络拓扑结构上反映节点的重要性,但是忽略了节点承担有功传送的本质功能。并且,在电抗权网络中,节点度 S 和聚类系数 C 的定义参考单位权下的定义,也存在类似的不足之处,只能反映节点之间的连接关系以及邻接点之间的连接关系,不能反映其连接强度的差异性。此外,对比改进权定义下的节点介数和电抗权定义下的节点介数,可以发现,承担重要有功传送功能的节点未必就是在网络拓扑上处于紧密连接关系的节点,如 16 号节点的介数,在电抗权定义下为 106,其值大于 6 号节点的介数值,但是在改进权定义下其值为 0.048,小于 6 号节点的介数值。

由表 6 可知,由电抗权定义下的支路介数仍存在表 5 中所示电抗权定义下的节点测度的不足之处。此外,由支路介数以及该支路两端节点的节点介数结果可知,节点介数的值较大,则必然存在一条连接边的支路介数较大,如由表 5 可知 6 号节点的节点度为 4,即该节点的连接支路数为 4,由表 6 可知,6 号节点的连接边中仅存在 2 条连接边承担较重的功率传送功能,分别为 6-31 和 5-6。因此,与同一节点连接的支路介数也存在一定程度上的不均匀性。在电力系统网络中,节点的重要性是由与其相连支路的重要性来决定的。

改进权网络从元件传送有功的本质功能出发来考虑边权,反映了电力系统电能传送的分布特点,能够描述节点之间连接强度的多样性,较真实地刻画了电力网络。

4 结论

本文提出了基于准稳态功率转移分布因子的改进支路权重模型,进而基于复杂网络的加权测度模型建立了电力系统网络的介数、节点度以及聚类系数模

型,采用一系列算例进行了全面详细的分析,得出结论如下。

a. 所提改进支路权重模型能够有效反映电力系统有功分布情况,具有一定的实际意义;改进支路权下的电力系统复杂网络特性模型同时考虑了电力系统元件的功率传送功能及其网络结构特点,更能反映电力系统元件复杂网络特性的差异性。

b. 在电力系统中,节点的重要性往往要高于支路的重要性,但节点的重要性通常在于与其相连支路的重要性。

c. 小规模电力系统包含较少元件,电网拓扑的非均匀性较弱,元件之间的连接较为紧密;大规模电力系统包含众多元件,电网拓扑特性具有明显的非均匀性,元件之间存在联系,但只有小部分元件之间的连接较为紧密。

d. 电力系统规模越小,元件的重要性差距较小,各元件相对整个系统网络而言是不可缺少的必要部分;电力系统规模越大,元件的重要性差距较大,小部分元件相对整个网络而言是必要组成部分。即小规模系统各元件对系统的功能均具有较大的影响,而大规模系统各元件对系统的功能影响差距较大,由于大规模系统的高度复杂性,因而大规模系统较小规模系统而言较易发生连锁故障以及大停电等灾难性故障。

本文的分析研究有助于对电力系统的复杂网络特性有清晰的认识和了解,所得结论将有助于结合电力系统的有功分布情况进一步从电力系统的复杂网络特性方面研究电力系统的脆弱性、连锁性故障以及大停电等灾难性故障。

参考文献:

[1] ARIANO S,B OMPARD E,CARBONE A,et al. Power grid vulnerability:a complex network approach[J]. Chaos,2009,19(1): 013119-1- 013119-6.

[2] LU Zongxiang,MENG Zhongwei,ZHOU Shuangxi. Cascading failure analysis of bulk power system using small world network model[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames,IA,USA:Iowa State University,2004:635-640.

[3] CRUCITTI P,LATORA V,MARCHIORI M. Model for cascading failures in complex networks[J]. Physical Review E,2004,69(4): 1-4.

[4] 艾欣,崔明勇,雷之力. 电力系统连锁故障研究综述[J]. 华北电力大学学报,2008,35(6):44-51.

AI Xin,CUI Mingyong,LEI Zhili. Review on cascading failure in power system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2008,35(6):44-51.

[5] 柏文洁,汪秉宏,周涛. 从复杂网络的观点看大停电事故[J]. 复杂系统与复杂性科学,2005,2(3):29-37.

BAI Wenjie,WANG Binghong,ZHOU Tao. Brief review of blackouts on electric power grids in view point of complex networks

- [J]. Complex System and Complexity Science, 2005, 2(3): 29-37.
- [6] 汪小帆. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 9-14.
- [7] 刘涛, 陈忠, 陈晓蓉. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程, 2005, 23(6): 1-7.
LIU Tao, CHEN Zhong, CHEN Xiaorong. A brief review of complex networks and its application[J]. Systems Engineering, 2005, 23(6): 1-7.
- [8] 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: 1-20.
- [9] KINNEY R, CRUCITI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. Euro Phys J B, 2005 (46): 101-107.
- [10] 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.
- [11] 史进, 涂光瑜, 罗毅. 电力系统复杂网络特性分析与模型改进[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 93-98.
SHI Jin, TU Guangyu, LUO Yi. Complex network characteristic analysis and model improving of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 93-98.
- [12] 顾雪平, 钟慧荣, 贾京华, 等. 电力系统扩展黑启动方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 25-32.
GU Xueping, ZHONG Huirong, JIA Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.
- [13] 王海霞, 刘娆, 赵彩虹, 等. 考虑节点间电气距离的潮流追踪损耗分摊方法[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊2): 196-201.
WANG Haixia, LIU Rao, ZHAO Caihong, et al. Power loss allocation based on power flow tracing with consideration of the electrical distance between buses[J]. Power System Technology, 2008, 32(Supplement 2): 196-201.
- [14] BLUMSACK S, HINES P, PATEL M, et al. Defining power network zones from measures of electrical distance[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: [s.n.], 2009: 1-8.
- [15] PARK Jongbae, LEE Kisong, SHIN Joongrin, et al. A new framework of marginal loss factors with consideration of the electrical distance [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, CA, USA: [s.n.], 2005: 538-543.
- [16] 栾兆文, 刘玉田, 樊涛. 电压静态稳定的等效电距离法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 41-45.
- LUAN Zhaowen, LIU Yutian, FAN Tao. Equivalent method for voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 1999, 11(3): 41-45.
- [17] 王耀喻, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224.
WANG Yaoyu, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. An expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electrical power system voltage / var optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [18] 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.
CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.
- [19] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-10.
DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-10.
- [20] 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.
- [21] 张伯明. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 210-217.
- [22] 郭雷, 许晓鸣. 复杂网络[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2006: 27-42.
- [23] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.

作者简介:

苏慧玲(1983-), 女, 河南周口人, 博士研究生, 研究方向为复杂电网的安全可靠性(E-mail: suhuil@163.com);

李 扬(1961-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统规划、复杂电网的安全可靠研究、电力市场和需求侧管理、智能电网等(E-mail: li_yang@seu.edu.cn)。

Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system

SU Huiling, LI Yang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the complex network theory and the actual active power distribution of power system, the quasi-steady PTDF(Power Transfer Distribution Factor) is applied to set up an improved branch weight model, which considers the active power injection of generator nodes and load nodes and reflects the connection strength between system nodes from the view of branch power transmission. The measurement models of power grid are built based on the definition of the improved branch weight, which, from the view of active power transmission and power grid topology, reflects comprehensively the diversity and heterogeneity of system components in complex network characteristics. Results of case analysis verify the effectiveness and feasibility of the proposed model.

Key words: electric power systems; quasi-steady PTDF; improved weight; complex network measurement; diversity; heterogeneity; models