

引用格式:秦津宇,毛晓明,董哲,等.一种实用的基于网络拓扑计算电气距离的方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):77-82.

Citation: QIN Jinyu, MAO Xiaoming, DONG Zhe, et al. A practical method for calculating electrical distance based on network topology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 77-82.

一种实用的基于网络拓扑计算电气距离的方法

秦津宇,毛晓明,董哲,房楚宁

(广东工业大学自动化学院,广东广州 510006)

摘要:电气距离 (electrical distance, ED) 是电网划分电压控制区域的主要依据。经典的 ED 计算方法与其改进方法都需利用潮流雅可比矩阵,这可能在电源和负荷随机性不断增强的背景下导致分区方案的频繁调整,增加无功电压管理的难度。因此,该文先在回顾 ED 经典定义的基础上,证明利用网络拓扑参数可近似地获得电力系统中一对节点在小扰动后的电压变化比值;然后,沿用经典 ED 的计算公式,给出一种基于网络拓扑计算 ED 的新方法;最后,将该文方法应用于 NE-39 和 NE-68 节点系统中,将得到的结果与经典方法的 ED 和分区方案进行比较,验证了该方法的有效性。

关键词:电气距离;电压控制区域;网络拓扑

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.008 **中图分类号:** TM711 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0077-09

A practical method for calculating electrical distance based on network topology

QIN Jinyu, MAO Xiaoming, DONG Zhe, FANG Chuning

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Electrical distance (ED) is the primary basis for dividing voltage control areas in power grids. Both classic methods and their improved versions for calculating electrical distance rely on the power flow Jacobian matrix, which may lead to frequent adjustments in partitioning schemes and increase the difficulty of reactive power and voltage management as the randomness of power sources and loads continues to grow. Therefore, this paper first reviews the classic definition of electrical distance and then demonstrates that the ratio of voltage changes at a pair of nodes in a power system after a small disturbance can be approximately obtained using network topology parameters. Next, following the classic formula for calculating electrical distance, a new method for computing electrical distance based on network topology is presented. Finally, this method is applied to the NE-39 and NE-68 node systems, and the results are compared with those obtained using the classic method in terms of electrical distance and partitioning schemes, validating the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: electrical distance; voltage controlling area; network topology

无功电压分区控制对于电力系统安全、稳定、经济运行十分关键^[1-4]。电气距离 (electrical distance, ED) 是衡量电力系统中各节点电气耦合程度的重要指标,是电网分区的主要标度。先借助潮流计算中的雅可比矩阵获得电压—无功灵敏度,再通过电压耦合度计算 ED,是电力系统的经典做法。在电网源—荷两端随机性日益增强的背景下,电力系统潮

流波动幅度日益增大且愈加频繁,基于潮流计算的 ED 也发生相应变化,导致分区边界节点不断调整^[5]。不仅如此,随着电网规模日益庞大,区域间的联系更紧密,电网运行条件更复杂^[6],也需要鲁棒性更强的 ED 计算方法来辅助无功电压分区。

很多研究对经典的 ED 进行了改进。文献[7]利用支路对源节点的电流灵敏度来定义 ED,但其

收稿日期:2022-08-11;修回日期:2023-07-16

基金项目:广东省自然科学基金(2023A1515010716,2020B1515130001)

通信作者:毛晓明(1971—),女,博士,副教授,主要从事电力系统运行分析与控制方面的研究;E-mail:mxmsunny@163.com

计算既未考虑接地支路,也未考虑线路电阻,其结果精度可能存在不足。文献[8]将2个节点到其他节点经典ED的平方和的根定义为这2个点的空间ED,该定义使得ED的计算复杂化,且该定义可能会减小计算结果区分度。文献[9]对经典算法中的灵敏度矩阵进行了改进,并认为其所推荐的灵敏度矩阵计算效果更优,但并未给出理论依据。文献[10]以潮流追踪为基础,构建广义支路求取等效传输阻抗并取其模作为ED,该定义能较好地适应潮流的动态变化,但从另一个角度来说,该方法得到的ED变化频繁,导致分区方案不稳定。

为应对在高比例可再生能源与柔性负荷接入背景下愈加频繁波动的电网潮流,文献[11]提出一种融合经典ED与边介数的电网无功分区方法,其通过设置不同的比例系数,有偏重地得到质量较高的分区结果。文献[12-14]针对分布式电源大量接入的情况,提出了综合阻抗距离和灵敏度矩阵的改进ED计算方法。文献[15]在经典的ED算法中加入修正系数以考虑风电波动的影响,其修正系数的求取涉及计算潮流断面的节点电压和潮流运行状态的统计概率。这些研究提升了ED计算结果的鲁棒性,但仍不能摆脱算法对潮流计算的依赖。

本文提出一种基于网络拓扑计算ED的新方法,该方法不需使用电力系统潮流信息,方便易算,其计算结果对电网运行方式变化的鲁棒性较好。

1 经典电气距离的定义

文献[4]最早基于电力系统潮流方程提出ED的计算方法。其主要思路是,先通过PQ解耦得到节点电压变化与无功注入之间的关系;再用小扰动后两个节点间电压变化的比值来表征它们之间的电气耦合程度;最后,通过数学变换,得到满足非负性和对称性的ED。其计算过程如下:

标幺制下,电力系统潮流计算修正方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ΔP 、 ΔQ 分别表示节点注入有功、无功功率的不平衡量; $\Delta \theta$ 、 ΔV 分别表示节点电压相角、幅值修正量; H 、 N 、 J 、 L 分别表示雅可比矩阵的4个子模块,其元素可由节点电压和系统节点导纳矩阵求得。

在高压电网中,节点电压水平主要取决于无功平衡情况,其与有功功率分布关系不大。因此,可只考虑电压与无功的关系^[16]。这意味着:当节点注

入无功发生变化时,有功功率的变化可忽略不计,即:可令式(1)中的 $\Delta P = 0$,则式(1)可化简为

$$\Delta V = S \Delta Q \quad (2)$$

式中, $S = [L - JH^{-1}N]^{-1}$ 是一个灵敏度矩阵,其元素 S_{ij} 表示节点 j 注入无功功率变化1个单位时,节点 i 电压幅值的变化量。

因此,当节点 i 注入无功功率变化量为 $\Delta Q_i \neq 0$ 时,节点 i 和 j 的电压变化分别为

$$\begin{cases} \Delta V_i = S_{ii} \Delta Q_i \\ \Delta V_j = S_{ji} \Delta Q_i \end{cases} \quad (3)$$

易知

$$\alpha_{ji} = \Delta V_j / \Delta V_i = S_{ji} / S_{ii} \quad (4)$$

式中, α_{ji} 为节点 j 与节点 i 之间电压变化的比值,称其为节点 j 与 i 之间的电气耦合度。

α_{ji} 越接近于1,节点 j 和节点 i 的电压变化越接近,电气耦合程度越紧密,其ED越小。在一般情况下, $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$ 。为使两点间ED满足对称性,定义节点 i 和节点 j 的电气距离 D_{ij} 为

$$D_{ij} = -\lg(\alpha_{ij} \alpha_{ji}) \quad (5)$$

不难发现,当利用式(5)计算节点间的ED时,除网络拓扑信息外,还需要用到系统的运行方式信息,计算较为复杂。本文提出一种基于网络拓扑参数来计算电气耦合度 α_{ij} 、 α_{ji} 与电气距离 D_{ij} 的方法。

2 基于网络拓扑参数的电气距离计算方法

电力网络 N 中,若通过设置扰动使得某节点 i 的电压发生小的变化,则网络中大部分节点 j 的电压也会发生变化。节点 j 和节点 i 电压变化的比值 α_{ij} 可衡量节点 i 、 j 间的电气耦合程度。由于励磁调节器的作用,扰动发生后的发电机节点的稳态电压一般不会变化。因此,可采用图1所示的等值电路来分析。在图1中,发电机通过升压变接入系统,发电机用恒压源 \dot{U}_G 表示,升压变压器用PI型等值电路表示,其参数 Z_{g0} 、 Z_{h0} 均为对地阻抗, Z_{gh} 为 g 、 h 之间的阻抗。

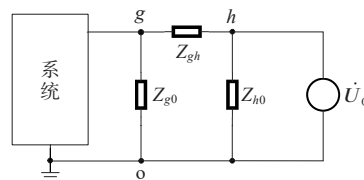


图1 发电机及其升压变与系统的连接示意

Figure 1 Connection diagram of the generator and its step-up transformer with the system

对图1中的 $g-o$ 端口右侧电路进行诺顿等值,可得图2。在图2中,电流源参数 $\dot{I}_G = \dot{U}_G/Z_{gh}$,等值阻抗 Z_{eq} 为 Z_{g0} 和 Z_{gh} 的并联。从图2中可以看出,等值后,发电机节点 h 被消去,电流源注入网络的电流 \dot{I}_G 为常数,节点 g 的自导纳没有发生变化。

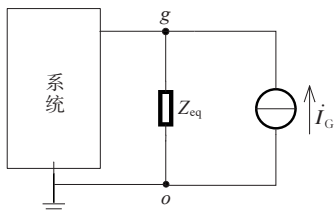


图2 诺顿等值电路

Figure 2 Norton equivalent circuit

假设网络 N 中节点总数为 m ,其对应的节点导纳矩阵为 $Y_{m \times m}$,发电机节点数为 n 。对该网络中所有发电机—升压变支路进行诺顿等值,得到新的电力网络 N' 。 N' 中节点总数 p 为 $m-n$,对应的节点导纳矩阵 $Y'_{p \times p}$ 可通过划去 $Y_{m \times m}$ 中发电机节点所在的行和列得到。记 $Y'_{p \times p}$ 的逆矩阵为节点阻抗矩阵 $Z'_{p \times p}$ 。

设 N' 中节点 i 的初始电压为 \dot{U}_i ,注入电流为 \dot{I}_i 。现投入接地电抗 z_{i0} ,其电压变化量为 $\Delta\dot{U}_i$,如图3所示。扰动发生后,节点 i 的稳态电压 \dot{U}_i 变为 $\dot{U}_i + \Delta\dot{U}_i$,从节点 i 注入系统的电流变成 $(\dot{I}_i - \dot{I}_{i0})$ ^[17], \dot{I}_{i0} 为流过阻抗 Z_{i0} 的电流。由于网络 N' 中 n 个电流源注入的电流均为恒定值,如果把网络中无源节点注入的电流也考虑为恒定值(文3.1将有更深入的讨论),扰动后 N' 中任意节点 j 的电压 \dot{U}_j' 可用阻抗矩阵 Z' 的元素表示,即

$$\begin{aligned} \dot{U}_j' = & Z_{j1}' \dot{I}_1 + Z_{j2}' \dot{I}_2 + \dots + Z_{ji}' (\dot{I}_i - \dot{I}_{i0}) + \\ & \dots + Z_{jp}' \dot{I}_p = \sum_{k=1}^p Z_{jk}' \dot{I}_k - Z_{ji}' \dot{I}_{i0} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, \dot{I}_k 为节点 k 的注入电流, $k=1,2,\dots,p$; Z_{jk}' 和 Z_{ji}' 分别为矩阵 Z' 中第 j 行、第 k 列的元素, $k=1,2,\dots,p$ 。

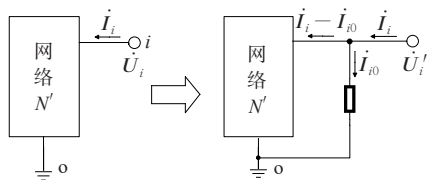


图3 扰动前后系统等值电路

Figure 3 Equivalent circuit of the system before and after perturbation

节点 i 的电压也应满足式(6),即

$$\dot{U}_i' = \sum_{k=1}^p Z_{ik}' \dot{I}_k - Z_{ii}' \dot{I}_{i0} \quad (7)$$

式中, Z_{ii}' 为矩阵 Z' 中第 i 行、第 i 列的元素。

由于 $\dot{U}_i' = z_{i0} \dot{I}_{i0}$,可解得

$$\dot{I}_{i0} = \frac{\sum_{k=1}^p Z_{ik}' \dot{I}_k}{Z_{ii}' + z_{i0}} = \sum_{k=1}^p \frac{Z_{ik}'}{Z_{ii}' + z_{i0}} \dot{I}_k \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),即

$$\dot{U}_j' = \sum_{k=1}^p \left(Z_{jk}' - \frac{Z_{ji}' Z_{ik}'}{Z_{ii}' + z_{i0}} \right) \dot{I}_k \quad (9)$$

对于扰动前的系统,有 $\dot{U}_j = \sum_{k=1}^p Z_{jk}' \dot{I}_k$,故有

$$\Delta\dot{U}_j = \dot{U}_j' - \dot{U}_j = -\frac{Z_{jk}'}{Z_{ii}' + z_{i0}} \sum_{k=1}^p Z_{ik}' \dot{I}_k \quad (10)$$

同理,对于节点 i ,有

$$\Delta\dot{U}_i = -\frac{Z_{ii}'}{Z_{ii}' + z_{i0}} \sum_{k=1}^p Z_{ik}' \dot{I}_k \quad (11)$$

联立式(10)、(11),有

$$\frac{\Delta\dot{U}_j}{\Delta\dot{U}_i} = \frac{Z_{ji}'}{Z_{ii}'} \quad (12)$$

则电压耦合度 α_{ji} 为

$$\alpha_{ji} = \left| \frac{\Delta\dot{U}_j}{\Delta\dot{U}_i} \right| = \left| \frac{Z_{ji}'}{Z_{ii}'} \right| \quad (13)$$

类似地,可得 α_{ij} 的表达式。再根据式(5),即可求得ED。综上所述,对于含 m 个节点、 n 台发电机的电力系统,本文提出的基于网络拓扑的ED计算方法的具体计算步骤如下:

- 1) 形成系统的节点导纳矩阵 $Y_{m \times m}$;
- 2) 对于 $Y_{m \times m}$,划去发电机节点所在的行和列,得到 $Y'_{(m-n) \times (m-n)}$ (即 $Y'_{p \times p}$);
- 3) 求 $Y'_{p \times p}$ 的逆矩阵,得到 $Z'_{p \times p}$;
- 4) 提取 $Z'_{p \times p}$ 中的元素,利用式(5)、(13)计算ED。

本方法只需利用网络拓扑参数,计算十分方便,对电力系统运行方式的变化有很好的适应性。值得注意的是,与经典ED一样,本文定义的ED不能计算发电机节点与其他节点间的ED。因此,基于ED划分电压控制区域时,一般把发电机节点划分至其升压变压器高压侧节点所在的区域。

3 算例分析

本文以NE-39节点系统^[18]和NE-68节点系统^[19]为例,利用MATLAB数值软件计算节点间的

电气耦合度和ED,并采用文献[20-21]推荐的谱聚类算法划分电压控制区域,以验证该方法的有效性。谱聚类算法具有计算简单,计算效率高,结果可靠等优点^[22]。

3.1 NE-39节点系统分析

对于NE-39节点系统,表1比较了时域仿真法、经典算法、该算法求出的代表性节点间的电气耦合度,表2比较了这3种方法计算得到的ED。其中,经典算法和本文算法的结果按照谱聚类方法求得;时域仿真法的结果利用仿真软件PSD-BPA通过切无功负荷、读取节点电压稳态变化得到。一般认为,商业电力系统计算分析软件采取时域仿真法得到的计算结果是准确的。因此,可将其作为参考值来校验其他方法的有效性。不过,时域仿真法并不是一种解析计算方法,不能从理论角度分析计算结果对参数的依赖性。因此,其难以为电力系统规划和运行提供参考,实际很少采用。

表1 NE-39节点系统电压耦合度计算结果比较

Table 1 Comparison of voltage coupling degree calculation results for the NE-39 node system

算法		电压耦合度			
		α_{12-15}	α_{21-15}	α_{24-15}	α_{27-15}
时域仿真法	恒阻抗	0.277	0.366	0.475	0.287
	恒电流	0.294	0.373	0.490	0.304
	恒功率	0.313	0.384	0.495	0.313
经典算法		0.305	0.378	0.489	0.310
本文算法		0.283	0.365	0.482	0.297

表2 NE-39节点系统电气距离计算结果比较

Table 2 Comparison of electrical distance calculation results for the NE-39 node system

算法		电气距离			
		D_{12-15}	D_{21-15}	D_{24-15}	D_{27-15}
时域仿真法	恒阻抗	1.482	0.849	0.611	1.204
	恒电流	1.418	0.829	0.582	1.150
	恒功率	1.358	0.799	0.562	1.106
经典算法		1.403	0.815	0.575	1.129
本文算法		1.470	0.852	0.599	1.175

由表1、2可知,当负荷采取恒阻抗、恒电流和恒功率模型时,时域仿真法求得的结果并不一致,表明负荷模型对电气耦合度和ED计算结果有一定的影响。该影响具体表现在:恒阻抗负荷模型对应的电气耦合度最小(ED最大),恒功率负荷模型对应的电气耦合度最大(ED最小),恒电流负荷模型介于这两者之间。这是因为,当受扰节点电压降低时,恒阻抗负荷消耗的无功与电压平方以成正比的方式减小,

有利于维持系统电压,观察节点电压变化较小;恒功率负荷消耗的无功保持不变,不利于维持系统电压,观察节点电压变化较大;恒电流负荷居中。

由表1、2还可知,本文算法、经典算法均与时域仿真法的计算结果均较为接近,但也有一定的误差。这是因为,本文推荐的算法是在扰动发生后,所有节点注入电流保持恒定的前提下得到的。因此,其计算结果与时域仿真法负荷采取恒电流模型(对应本文第2章所述“忽略无源节点注入电流的变化”)的结果更为接近,误差原因在于该算法只能保证发电机注入电流的幅值恒定,忽略了相角的变化;经典ED计算方法把负荷考虑为恒功率模型。因此,其计算结果与时域仿真法负荷采取恒功率模型的结果更为接近,其误差来源于推导V-Q灵敏度时,其算法假设有功功率和无功功率是完全解耦的,这在电力系统中只是近似成立的。总体而言,本文算法与经典算法精度相当,表明利用网络拓扑参数计算ED具有可行性。

图4给出根据经典和改进ED采用谱聚类算法划分电压控制区域得到的结果。从图4中可以看出,这二者并无区别。这进一步验证了改进ED算法的有效性。值得一提的是,当潮流发生变化时,经典方法计算出的ED会变,可能导致分区方案发生变化^[23];但本文算法则仅在网络拓扑或参数变化时,才会对ED计算结果与分区方案产生影响。不过,潮流变化对分区方案的影响一般并不显著,主要是区域边界节点的归属可能发生变化^[8]。如果电网运行人员不希望由于运行方式变化而导致无功电压分区方案频繁调整,本文方法显然更为实用。

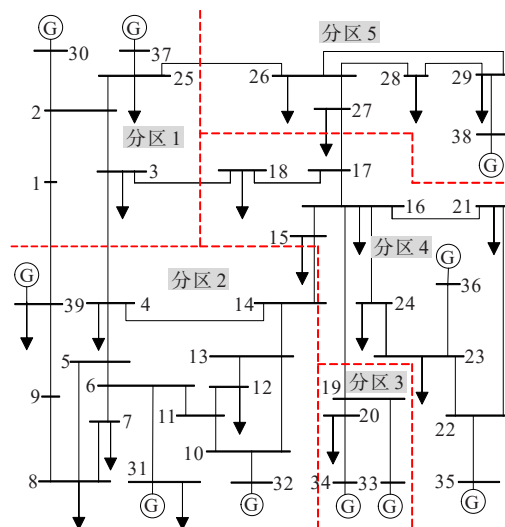


图4 NE-39节点系统分区

Figure 4 Partition diagram of the NE-39 node system

3.2 NE-68 节点系统分析

对于 NE-68 节点系统,表 3 比较了时域仿真法、经典算法、本文算法计算得到的代表性节点间的电气耦合度,表 4 比较了这 3 种方法计算得到的 ED,这 3 种方法的分区结果如图 5 所示。

表 3 NE-68 节点系统电压耦合度计算结果比较

Table 3 Comparison of voltage coupling degree calculation results for the NE-68 node system

算法	电压耦合度				
	α_{21-67}	α_{27-67}	α_{64-67}	α_{68-67}	
时域仿真法	恒阻抗	0.323	0.242	0.222	0.495
	恒电流	0.327	0.248	0.228	0.495
	恒功率	0.386	0.307	0.287	0.545
经典算法	0.371	0.293	0.277	0.529	
本文算法	0.357	0.280	0.259	0.520	

表 4 NE-68 节点系统电气距离计算结果比较

Table 4 Comparison of electrical distance calculation results for the NE-68 node system

算法	电气距离				
	D_{21-67}	D_{27-67}	D_{64-67}	D_{68-67}	
时域仿真法	恒阻抗	0.942	1.360	1.653	0.398
	恒电流	0.942	1.329	1.597	0.381
	恒功率	0.802	1.133	1.432	0.346
经典算法	0.834	1.165	1.478	0.353	
本文算法	0.872	1.212	1.539	0.369	

由表 3、4 和图 5 可知,负荷模型对电气耦合度和 ED 计算结果有一定的影响;以时域仿真法为参考,经典算法和本文算法的计算精度相当;采用这两种 ED 划分电压控制区域的结果基本一致。这些结果再次证明了本文算法的有效性和实用性。

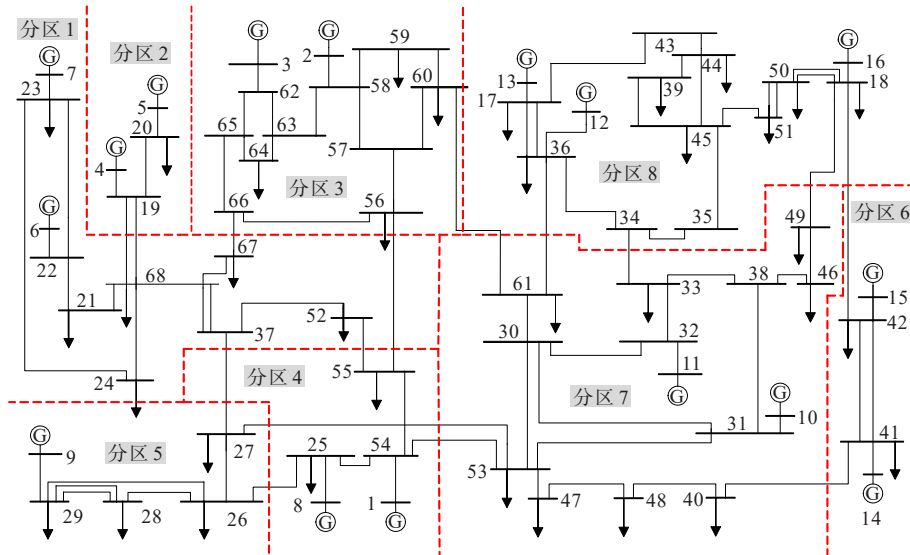


图 5 NE-68 节点系统分区结果

Figure 5 Partition diagram of the NE-68 node system

4 结语

本文提出一种利用网络拓扑参数计算节点间电气耦合程度和 ED 的计算方法,规避了计算 ED 时对潮流雅可比矩阵的依赖。该方法原理简单,实现方便,其结果对运行方式变化具有鲁棒性。在 NE-39 节点和 NE-68 节点系统中进行的仿真研究也证明了该方法的有效性。

聚类算法的选择对于无功电压分区方案也有很大影响。本文采用的谱聚类算法虽有诸多优点,但对高维原始数据的信息传递能力不够强大,当类间的样本点差别较大时,其聚类效果可能不佳。提

出更合理的分区算法是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] 李益华,林文南.一种改进的 Tabu Search 算法及其在区域电网无功优化中的应用[J]. 电力科学与技术学报, 2008,23(2):60-65.
LI Yihua, LIN Wennan. Improved tabu search algorithm based reactive power optimization in regional power grid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008,23(2):60-65.

[2] 任鹏,李翀,陶鹏,等.基于加权熵 TOPSIS 法的电网节点脆弱度评估[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(3):143-149.
REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Node vulnerability

- evaluation for power network based on weighted entropy TOPSIS method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2019,34(3):143-149.
- [3] 粟世玮,张谦,熊炜,等.含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J].*电网与清洁能源*,2023,39(1):100-110+119.
SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. *Power System and Clean Energy*,2023,39(1):100-110+119.
- [4] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,1989,4(2):479-486.
- [5] 孙宏斌,郭庆来,张伯明.电力系统自动电压控制[M].北京:科学出版社,2018:95-98.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Baiming. Automatic voltage control for power systems[M]. Beijing: Science Press,2018:95-98.
- [6] 余建树,李朝霞,龚雪娇,等.基于并行粒子群算法的电力系统分区抗差状态估计[J].*电网技术*,2022,46(8):3139-3149.
YU Jianshu, LI Zhaoxia, GONG Xuejiao, et al. Robust state estimation of power system based on parallel particle swarm optimization and partition calculation[J]. *Power System Technology*,2022,46(8):3139-3149.
- [7] 柯永超,廖凯,李波,等.基于双层优化规划的线路过载控制策略[J].*电力自动化设备*,2021,41(12):158-165.
KE Yongchao, LIAO Kai, LI Bo, et al. Line overload control strategy based on bi-level optimization programming[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2021,41(12):158-165.
- [8] 郑吉祥,钟俊.基于节点类型和分区耦合性的复杂网络无功电压快速分区方法[J].*电网技术*,2020,44(1):223-230.
ZHENG Jixiang, ZHONG Jun. A complex network theory fast partition algorithm of reactive voltage based on node type and coupling of partitions[J]. *Power System Technology*,2020,44(1):223-230.
- [9] 李英量,王康,王德明,等.考虑弱耦合关系的全维灵敏度矩阵快速VCA方法[J].*电测与仪表*,2022,59(1):69-76.
LI Yingliang, WANG Kang, WANG Deming, et al. A fast VCA method of full-dimensional sensitivity matrix considering weak coupling relationship[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2022,59(1):69-76.
- [10] 鲍海,房国俊.一种采用等效传输阻抗法的新型电气距离计算方法及其应用[J].*电网技术*,2019,43(1):244-250.
BAO Hai, FANG Guojun. A new method of electrical distance calculation and its applications used the equivalent transmission impedance method[J]. *Power System Technology*,2019,43(1):244-250.
- [11] 李鹏,王加浩,徐贤,等.面向新型电力系统潮流频繁波动的无功鲁棒分区方法[J].*电力系统自动化*,2022,46(11):102-110.
LI Peng, WANG Jiahao, XU Xian, et al. Robust reactive power partitioning method for frequent power flow fluctuation in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2022,46(11):102-110.
- [12] 张倩,丁津津,张道农,等.基于集群划分的高渗透率分布式系统无功优化[J].*电力系统自动化*,2019,43(3):130-137.
ZHANG Qian, DING Jinjin, ZHANG Daonong, et al. Reactive power optimization of high-penetration distributed generation system based on clusters partition[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2019,43(3):130-137.
- [13] 张晓英,侯秉臣,王琨,等.基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J].*高压电器*,2022,58(11):221-229.
ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*,2022,58(11):221-229.
- [14] 彭泽森,舒恺,高飞翔,等.基于改进蜉蝣算法的一种新型无功优化补偿方法及其应用[J].*智慧电力*,2022,50(12):41-47.
PENG Zesen, SHU Kai, GAO Feiling, et al. A novel modified mayfly algorithm-based reactive power optimization compensation method and its application[J]. *Smart Power*,2022,50(12):41-47.
- [15] 张旭,陈云龙,王仪贤,等.基于潮流断面修正的含风电电网无功-电压分区方法[J].*电力自动化设备*,2019,39(10):48-54.
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, WANG Yixian, et al. Reactive power-voltage partitioning of power grid with wind power based on correction of power flow section[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2019,39(10):48-54.
- [16] 张赞宁,石泽.基于快速搜索与发现密度峰值聚类算法的含有分布式光伏的配电网电压分区协调控制[J].*现代电力*,2020,37(1):35-41.
ZHANG Yunning, SHI Ze. Voltage partition coordinated control of distribution network with distributed photovoltaic based on CFSFDP algorithm[J]. *Modern Electric Power*,2020,37(1):35-41.
- [17] 何仰赞,温增银著.电力系统分析[M].3版.武汉:华中科技大学出版社,2002:62-65.

- YU Haoming,LIU Jie,MU Xinwei,et al.Orderly charging strategy of charging stations based on dynamic time-sharing charging price response[J]. Power Systems and Big Data,2023,26(2):1-9.
- [19] 张高山,江御龙,刘永春.考虑充电桩最优效率的电动汽车有序充电模型[J].自动化与仪器仪表,2023(1):64-68.
ZHANG Gaoshan,JIANG Yulong,LIU Yongchun. Orderly charging model for electric vehicles considering optimal efficiency of charging pile[J]. Automation & Instrumentation,2023(1):64-68.
- [20] 陈果,王秀丽,原晟淇,等.适用于大规模充电场站的深度强化学习有序充电策略[J].电力系统自动化,2023,47(2):88-95.
CHEN Guo,WANG Xiuli,YUAN Shengqi,et al. Coordinated charging strategy applicable to large-scale charging stations based on deep reinforcement learning [J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(2): 88-95.
- [21] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等.基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1307-1321+1538.
LI Peng,WU Difan,LI Yuwei,et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and Stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(4):1307-1321+1538.
- [22] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].高压电器,2022,58(5):164-171.
XIAO Li,XIE Yaoping,HU Huafeng,et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(5):164-171.
- [23] 刘丽军,陈昌,胡鑫,等.基于“车—路—站—网”信息耦合的电动汽车有序充电策略[J].高电压技术,2024,50(2):693-703.
LIU Lijun,CHEN Chang,HU Xin,et al. Ordered charging strategy for electric vehicles based on the information coupling of vehicle-road-station-grid[J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):693-703.
- [24] 王均,黄柯然,许潇,等.基于阶梯碳价和自适应分时电价的电动汽车有序充电[J].电力自动化设备,2024,44(2):64-71.
WANG Jun,HUANG Keran,XU Xiao,et al. Order charging of electric vehicles based on ladder-type carbon price and adaptive time-of-use electricity price [J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(2):64-71.
- [25] 郑远硕,李峰,董九玲,等.“车—路—网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(12):88-97.
ZHENG Yuanshuo,LI Feng,DONG Jiuling,et al. Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(12):88-97.
- [26] 王立夫,钟昊男,郭戈.基于拥堵系数的道路交通网络关键路段辨识[J].控制与决策,2023,38(3):843-849.
WANG Lifu,ZHONG Haonan,GUO Ge. Identification of key road sections of road traffic network based on congestion coefficient[J]. Control and Decision,2023,38(3):843-849.
- [27] 葛少云,郭建祚,刘洪,等.计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J].电网技术,2014,38(7):1806-1811.
GE Shaoyun,GUO Jianyi,LIU Hong,et al. Demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2014,38(7):1806-1811.

(上接第 82 页 Continued from page 82)

- HE Yangzan,WEN Zengyin. Electric power system analysis[M].3rd edition. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology Press,2002:62-65.
- [18] 邵瑶,汤涌.一种快速评估多馈入直流系统换相失败风险的方法[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3429-3436+3670.
SHAO Yao,TANG Yong. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3429-3436+3670.
- [19] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M].Boston, Springer US,1989:27-36.
- [20] 马喜平,何世恩,姚寅,等.计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J].电力系统保护与控制, 2022,50(10):123-131.
MA Xiping,HE Shien,YAO Yin,et al. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. Power System Protection and Control,2022,50(10):123-131.
- [21] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Boston: Springer US,2000:85-92.
- [22] MAO X M,ZHU W F,WU L,et al. Optimal allocation of dynamic VAR sources using zoning-based distributed optimization algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2019,113:952-962.
- [23] 刘扬,徐潇源,马洪艳,等.基于谱聚类与功率传输分布因子的电网静态等值[J].现代电力,2018,35(3):24-31.
LIU Yang,XU Xiaoyuan,MA Hongyan,et al. Power system static equivalence based on spectral clustering and power transfer distribution factors[J]. Modern Electric Power,2018,35(3):24-31.