

基于电网中枢点识别的无功电压控制分区方法

成煜, 杭乃善

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对传统无功电压聚类分区后各分区中枢点较难定量分析确定的问题, 从先定量判别出整个电网的中枢节点再完成无功电压分区, 提出将电网所有 PV 节点松弛为 PQ 节点, 由注入电流形式的潮流方程计算出全网电压越限节点, 利用越限节点电压与电网其余节点电压间的线性灵敏度不断校正直到全网节点电压不再越限, 通过进一步潮流计算校验, 确定所有中枢节点。将全网中枢点数目确定为应划分成的分区数, 以节点电压与节点注入无功电流之间的线性灵敏度为无功电压标度, 建立无功源控制空间, 引入云聚类算法, 完成全网节点从无功源控制空间向云模型的转换, 进而由云发生器完成以所定中枢点为中心的电网所有节点的聚类软划分。IEEE 14、IEEE 30 节点输电网络仿真测试结果, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 中枢点; 线性灵敏度; 无功源控制空间; 云模型; 电压分区; 电压控制; 模型; 灵敏度分析; 聚类算法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.007

0 引言

二级电压控制分区是电网电压自动控制(AVC)的关键环节, 合理的无功电压分区与中枢点的选择对提高电压控制的质量、为上级优化进一步提高经济性起重要作用。对于无功电压控制分区, 已经有了较为成熟的研究成果^[1-4]。主要以潮流方程雅可比矩阵无功电压线性化灵敏度关系为标度表征电网各节点之间的无功电压耦合性, 各种聚类算法已广泛应用于分区之中^[2-9]。

中枢节点是某些能反映全网的电压水平的节点, 尤其是电网中少数拥有较高输电电压等级的大容量枢纽变电站, 一般具有调压能力、联接的负荷支路较多、有较大无功调节量的发电厂等特点。实际上, 对一定层级电网, 自动电压闭环控制监控的中枢母线并不唯一, 这在省调、地调 AVC 系统中较明显, 本文主要从网调层面, 从对全网优化起关键约束的中枢节点的角度分析确定电网中枢母线。在二级电压控制中中枢点电压执行上级优化电压指标, 将电压控制在设定值范围内。可调节无功发电厂作为系统的最主要无功源, 也是最直接、最经济的调压手段, 对系统电压运行水平有重要影响。电气距离的变化、网架结构的复杂、发电机调节本身的局限性, 使得串并联电容、同步调相机、有载调压变压器分接头调节作为重要的辅助调压方式, 实现各节点无功电压就地平衡, 这也是三级电压控制中执

行环节的主要内容。

对于无功电压分区, 传统方法是先由各聚类算法实现二级电压控制分区的划分, 再在各分区主要应用优化算法确定中枢节点。文献[2]针对每个 PV 节点, 每次松弛为 PQ 节点, 设置新的平衡节点, 经多次形成考虑准稳态调节过程的无功电压全维度灵敏度矩阵, 将机组与负荷节点同时进行聚类分区。文献[4-5]用模糊聚类算法对 IEEE 39 节点网络进行电压分区, 对分区可能存在的孤立节点、PV 节点, 按电网物理连接距离进一步归并。文献[5]分别将谱系数平均距离法和模糊 C 均值聚类算法应用于河南电网进行电压分区, 依据负荷节点可控性与可观性灵敏度并由贪婪算法实现分区中枢节点选择。文献[7]针对分区中枢节点数量难以确定的问题, 通过引入多元统计分析理论中的主成分分析与因子分析方法确定中枢节点。文献[9]在能量函数数学模型的基础上构建能量/电压灵敏度矩阵, 并由模糊聚类算法实现电压分区。文献[10]用粒子群优化算法设计目标函数, 将二级电压分区与各区中枢点选择同时进行。文献[11-13]计及各无功电压控制分区间的相互影响, 对紧急工况下协调区域间无功支援进行建模仿真。

本文优先考虑最高级即三级电压所需优化控制的全网中枢点, 先将所有 PV 节点的机端电压放开不设限制, 松弛为 PQ 节点, 利用注入电流形式的潮流方程, 通过潮流计算不断识别电压越限点并由电压相关性灵敏度进行校正直到无电压越限点。控制中枢节点电压并代入潮流方程校验, 确定全网中枢节点。将各中枢点确定为全网无功电压所需分区数目, 建立无功源控制空间, 引入云聚类算法^[14], 将和中枢节点母线电气相关性大的厂站母线组成一个控制分区, 进一步调整, 完成电网所有节点的无功电压分区。对

收稿日期: 2014-12-27; 修回日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277034); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSZ2012026)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277034) and the Graduate Student Education Innovation Projects of Guangxi(YCSZ2012026)

IEEE 14、IEEE 30 节点输电网络进行了仿真验证。

1 灵敏度分析

1.1 注入电流形式的潮流方程

注入电流形式潮流计算节点功率方程推导如下, n 节点交流系统的节点电压方程为^[15]:

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU} \quad (1)$$

式(1)中,对系统任意一个节点 i ,其注入电流 \mathbf{I}_i 为:

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{I}_{xi} + j\mathbf{I}_{yi} = \sum_{j=1}^n (\mathbf{G}_{ij} + j\mathbf{B}_{ij})(e_j + jf_j) \quad (2)$$

将式(2)左边注入电流的实部、虚部分开表示:

$$\mathbf{I}_{xi} = \sum_{j=1}^{n-1} (\mathbf{G}_{ij}e_j - \mathbf{B}_{ij}f_j) + \mathbf{G}_{in}e_n \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_{yi} = \sum_{j=1}^{n-1} (\mathbf{G}_{ij}f_j + \mathbf{B}_{ij}e_j) + \mathbf{B}_{in}e_n \quad (4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n-1$ 。

将式(3)、(4)表示成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_x \\ \mathbf{I}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & -\mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \\ \mathbf{B}_n \end{bmatrix} e_n \quad (5)$$

节点注入功率可表示为电压与节点电流乘积的非线性形式,如式(6)所示:

$$\begin{cases} P_i = e_i I_{xi} + f_i I_{yi} \\ Q_i = f_i I_{xi} - e_i I_{yi} \end{cases} \quad (6)$$

其中,第 n 个节点为平衡节点; \mathbf{G} 、 \mathbf{B} 分别为 $n-1$ 阶节点导纳矩阵的实部和虚部; \mathbf{G}_n 、 \mathbf{B}_n 分别为节点导纳矩阵与平衡节点所在列相关的实部与虚部; e_n 为平衡节点电压的实部。对于常规 PV 节点,可在式(6)迭代求解过程中对 e_i 、 f_i 依然取节点电压幅值 U_i 恒定作为迭代限制条件。在潮流计算中给定电压平启动初值,逐次迭代逼近直到满足收敛性要求。经换算和矩阵求逆得直角坐标下电压实部、虚部与节点注入电流实部、虚部间迭代方程的线性化矩阵形式,即:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_x \\ \mathbf{I}_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \\ \mathbf{B}_n \end{bmatrix} e_n \quad (7)$$

其中, $\mathbf{X} = -(\mathbf{B} + \mathbf{GB}^{-1}\mathbf{G})^{-1}$; $\mathbf{R} = -\mathbf{B}^{-1}\mathbf{GX}$ 。这样,由式(5)或式(7)与式(6)联立,交替迭代求解直到节点电压实部、虚部达到收敛要求。

1.2 无功电压灵敏度推导

无功电压控制灵敏度多由牛顿拉夫逊法潮流计算雅可比矩阵中令 $\Delta P=0$,推导出 $\Delta U/\Delta Q$ 的灵敏度关系,也有直接用有功无功解耦的快速算法中取无功电压迭代矩阵。对于注入电流形式的潮流方程,则将式(7)两边微分线性化有:

$$\begin{bmatrix} d\mathbf{e} \\ d\mathbf{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{I}_x \\ d\mathbf{I}_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \\ \mathbf{B}_n \end{bmatrix} de_n \quad (8)$$

而对于高压输电网络,因 $R_{ij} \ll X_{ij}$,即线路电阻远小于电抗,故可近似取 $R_{ij}=0$,则有:

$$\Delta \mathbf{e} = -\mathbf{X}\Delta \mathbf{I}_y \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{f} = 0\Delta \mathbf{I}_y \quad (10)$$

因 $U_i = \sqrt{e_i^2 + f_i^2}$,根据式(9)、(10)关于注入无功电流 \mathbf{I}_{yk} 的复合函数关系,可得:

$$\frac{\partial U_i}{\partial I_{yk}} = \frac{-e_i X_{ik}}{U_i} \quad (11)$$

同理对节点 j 有:

$$\frac{\partial U_j}{\partial I_{yk}} = \frac{-e_j X_{jk}}{U_j} \quad (12)$$

由式(11)、(12)对同一注入无功电流 \mathbf{I}_{yk} 的灵敏度,可将节点电压 U_i 与 U_j 相关联。即可得系统节点电压间的相关性灵敏度为:

$$\frac{\partial U_j}{\partial U_i} = \frac{U_i(-e_j X_{jk})}{U_j(-e_i X_{ik})} \quad (13)$$

节点电压幅值主要决定于节点电压实部,当近似取 $U_i \approx U_j$ 、 $e_i \approx e_j$ 作估算,则:

$$\frac{\partial U_j}{\partial U_i} = \frac{X_{jk}}{X_{ik}} \quad (14)$$

由式(9),节点电压实部主要与节点注入无功电流相关,其相关性灵敏度为 $-\mathbf{X}$ 。它将节点无功调整与电压幅值的相关性用注入电流与电压实部的线性网络关系表示出来。式(14)是节点电压幅值之间的相关性灵敏度。

1.3 系统网损对电压灵敏度

对中枢点电压进行调节控制,在三级电压控制中确定中枢点电压约束范围,无功电压调节的网损经济性是重要指标。

有功网损为:

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{PV}}} P_{Gi} + \sum_{j=1}^{n_{\text{PQ}}} P_j \quad (15)$$

代入式(6)可得:

$$P_{\text{Loss}} = [\mathbf{I}_x^T \quad \mathbf{I}_y^T] \begin{bmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix} + e_n I_{xn} \quad (16)$$

代入式(5)可得:

$$P_{\text{Loss}} = \mathbf{e}^T \mathbf{G}^T \mathbf{e} - \mathbf{f}^T \mathbf{B}^T \mathbf{e} + \mathbf{G}_n^T e_n \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \mathbf{B}^T \mathbf{f} + K_1 \quad (17)$$

其中, K_1 为与节点电压实部无关的常量;对高压输电网络, n_{PV} 、 n_{PQ} 分别为全网 PV、PQ 节点的数目。取 $G_{ij} \gg B_{ij}$,考虑节点电压幅值主要由电压实部影响,则有系统有功网损对电压实部的灵敏度:

$$\frac{\partial P_{\text{Loss}}}{\partial \mathbf{e}} = (\mathbf{G}^T + \mathbf{G})\mathbf{e} + K_2 \quad (18)$$

其中, K_2 为与节点电压实部无关的常量,这也表明对于系统中枢点,其电压约束范围或上限值越高,其对有功网损的灵敏度越大,合理调控该节点电压就能提高系统运行的经济性。

2 中枢节点的确定与校验

2.1 电压中枢点及其识别步骤

电力系统电压由无功电源调节,因电源、无功设

备的配置及其调控能力的局限性,要满足全网的电压水平,可利用有无功调节容量的发电机来侧重控制少数中枢节点的电压在一定范围内,进而使全网电压满足要求且能减轻分散调压的负担。本文中节点考虑主要从能为全网优化经济运行提供有效节点电压约束条件,从网调 AVC 角度出发分析确定。电网电压是电能质量、系统安全性和经济性等运行水平的反映,故各点电压均须在所希望的电压偏移内,如输电网络中的 $U_N \sim 1.05U_N$ (U_N 为该电压等级输电网的额定电压)。当中枢点电压达到其上限值,有助于减少系统网损和提高系统的电压稳定性。在具体计算中,将发电机节点松弛为 PQ 节点,即测试在全网机组无功功率全部额定发出时,在相对正常运行条件下无功功率极大充裕时,系统中出现的电压幅值越限的发电厂母线或变电站节点,形成该条件下的越限点集,那么中枢点就在这集合当中。中枢点电压应能影响尽量大的区域,使该区域各点电压值也符合运行的电压质量要求,以该中枢点为中心,根据无功电压相关性可确定有效电压分区。

因此,本文通过先将除平衡节点以外的发电机节点松弛为 PQ 节点,使机组无功功率输出达到上限值,设置电压越上限值,再由式(5)经潮流计算,可识别出发电机无功满发条件下节点电压幅值越限点,即若令中枢点电压幅值范围为 $[U_{\min}, U_{\max}]$, 当 $U_i > U_{\max}$ 或者 $U_i < U_{\min}$, 则将出现电压不等式越限。令 $S_U = \{U_i \mid U_i \geq U_{\max}, i=1, 2, \dots, n-1\}$ 为电压无限制条件下的越上限电压节点的集合。

取 k 为 S_U 中一电压越限集中电压最高节点, 令其取电压上限值, 根据与越限值的电压幅值差, 由与其余节点电压的相关性灵敏度, 对除平衡节点及该越限节点外的节点 ($j=1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n-1$) 电压收敛值进行校正, 即:

$$\Delta U_k = U_{k_{\max}} - U_k \quad (19)$$

则相对应其他节点 j 的电压变化量为:

$$\Delta U_j = \frac{\partial U_j}{\partial U_k} \Delta U_k \quad (20)$$

经校正, 新的越限电压的集合为:

$$S_{U1} = \left\{ U_j + \frac{\partial U_j}{\partial U_k} \Delta U_k \mid U_k \geq U_{k_{\max}} \right\} \quad (21)$$

式(19)~(21)从最初的越限电压集开始不断进行电压校正, 直到把所有越限点电压幅值取上限后, 系统所有电压都不越限为止, 则这些取其电压上限后使全网节点电压稳定在约束范围内的越限点就是电网中枢节点。

因此, 本文所提出的电压中枢点的识别步骤如下。

a. 先设定节点电压上、下限, 即 $[U_{\min}, U_{\max}]$, 将除平衡节点外所有 PV 节点松弛为 PQ 节点进行注入

电流潮流计算, 估算电网电压。由式(5)形成越限电压集合 S_U 并将越限电压降序排列。

b. 对越限电压集合中的最高电压点, 按式(19)得其须降低的电压 ΔU_k 且修正当 U_k 不越限后各点的电压, 形成新的越限电压集合 S_{U1} 。不断校正并形成新的越限电压集直到无越限电压。

2.2 中枢节点的校验

对于识别出的全网中枢节点集, 令每个中枢节点电压取其电压上限值即为确定量, 即:

$$U_2 = \sqrt{e_2^2 + f_2^2} = U_{\max} \quad (22)$$

而其余节点电压为待求量:

$$U_1 = e_1 + jf_1 \quad (23)$$

则式(7)可进一步分块调整表示为:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & -X_{11} & -X_{12} \\ R_{21} & R_{22} & -X_{21} & -X_{22} \\ X_{11} & X_{12} & R_{11} & R_{12} \\ X_{21} & X_{22} & R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{y1} \\ I_{y2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e'_1 \\ e'_2 \\ f'_1 \\ f'_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} e' \\ f' \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{X} \\ \mathbf{X} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \\ \mathbf{B}_n \end{bmatrix} e_n$$

将电压方程拆分为:

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & -X_{11} \\ X_{11} & X_{12} & R_{11} \\ X_{21} & X_{22} & R_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{y2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_{12} \\ R_{12} \\ R_{22} \end{bmatrix} I_{y2} + \begin{bmatrix} e'_1 \\ f'_1 \\ f'_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$e_2 = \begin{bmatrix} R_{21} & R_{22} & -X_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{y1} \end{bmatrix} - X_{22} I_{y2} + e'_2 \quad (26)$$

设 $f_2 \ll e_2$, 近似将中枢点电压实部取成电压上限幅值, 即令 $e_2 \approx U_{\max}$ 为边界值, 则中枢节点注入无功电流为:

$$I_{y2} = X_{22}^{-1} \left\{ U_{2_{\max}} - e'_2 - \begin{bmatrix} R_{21} & R_{22} & -X_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{x2} \\ I_{y1} \end{bmatrix} \right\} \quad (27)$$

其中, I_{x1}, I_{y1}, I_{x2} 为由 2.1 节步骤 **a** 计算所得的未设定中枢节点且系统全 PQ 节点时的相应节点注入电流收敛值。

进一步将式(27)得出的 I_{y2} 回代入式(25), 可得相应的各节点电压实部、虚部, 即 e_1, f_1, f_2 , 如果校验后 U_1, U_2 均无越限且中枢点电压在上限值, 说明该中枢点集的确定是合理的。

3 云聚类算法完成无功电压分区

3.1 云聚类算法

云模型是用自然语言同时考虑分类边界的模糊性及事件发生的随机性, 将定性描述转换成定量表示的数学模型^[16-18], 能较好地反映自然概念的不确定性, 反映随机性和模糊性之间的关联。

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念, 若定量值 T 是定性概念 C 的一次随机实现, 则 T 对 C 描述的准确度 $\mu(T) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数。 T 在论域上的分布称为云分布, 每个 T 称为一个云滴^[15-17]。 正态云所处的概念特征可表示为 (E_x, E_n, H_e) 。 E_x 为 T 的期望; E_n 为 T 的标准差; H_e 为 T 的方差, 表示离散程度。 云滴可由云发生器产生, 本文用到逆向正态云发生器及 T 云发生器 2 种云发生器^[17]。

(1) 逆向正态云发生器。 输入为 (T_1, μ_1) 、 (T_2, μ_2) 、 \dots 、 (T_m, μ_m) , 输出为 $(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) (i=1, 2, \dots, m)$ 。

a. 计算该组数据的样本均值 $\bar{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i$, 一阶样本绝对中心矩为 $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |T_i - \bar{T}|$, 样本方差为 $S^2 = \frac{1}{m-1} \times \sum_{i=1}^m (T_i - \bar{T})^2$;

b. $E_x = \bar{T}$;

c. $E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |T_i - \bar{T}|$ 。

(2) T 云发生器。 输入为 $(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) (i=1, 2, \dots, m)$, 输出为 (T_1, μ_1) 、 (T_2, μ_2) 、 \dots 、 (T_m, μ_m) 。

a. $E'_n = \text{rand}(E_n, H_e)$, 即取 E_n 和 H_e 之间的随机数;

b. 计算云滴隶属度 $\mu_i = e^{-(E_{xi} - E_x) / [2(E'_n)^2]}$ 。

正态云滴生成后经云运算逐步进行概念水平提升形成高层次概念的正态云滴^[17]。 而电压分区数或第 2 节所定中枢点数决定了最终生成的高层次概念正态云滴的个数。 每个高层次正态云滴代表一个强概念云团, 可视作强耦合或相关性高的节点集, 中枢节点是其耦合中心。 依据最初各正态云滴具体特征参数, 通过云发生器计算对最终生成的高层次概念云团的隶属度, 实现对云滴的聚类软划分。 由于建立无功源控制空间^[2]并实现向云模型的转换, 相应地也就实现了对全网节点向相关度高的中枢节点的聚类软划分。

通过建立无功源控制空间, 进一步确定各节点间的电气距离, 通过计算负荷节点每次合并过程中的相对距离 (即每次合并的最小距离与最大距离比) 分析比较聚类算法的优劣, 每次聚类中相对距离越小表示对节点的聚类划分越彻底, 相应地, 该算法对节点间无功电压耦合关系解耦得越彻底。

应用文献[2]中方法对云聚类算法与改进 Ward 聚类算法应用于 IEEE 30 节点系统的 24 个负荷节点聚类过程比较结果如图 1 所示, 图中相对合并距离为标么值。

由图 1 可见, 对于纵轴任一聚类过程而言, 应用云聚类算法的相对距离要远小于改进 Ward 算法, 从

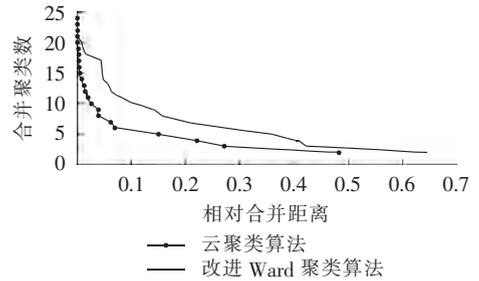


图 1 相对合并距离

Fig.1 Relative merging distance

而对系统无功电压解耦的效果更好。

3.2 无功电压分区步骤

a. 建立无功源控制空间。 对 $n-1$ 阶线性网络灵敏度 (不包含平衡机组) 取其绝对值 $|-X|$, 取所有节点与系统所有无功功率可调发电机组之间的灵敏度矩阵, 进一步形成 $(n-1) \times n_{pv}$ 维的负荷节点空间灵敏度矩阵, $n-1$ 是除平衡节点外的节点数, n_{pv} 是全网所有的发电机节点数。 将节点映射到由各控制机组组成的无功源控制空间^[2], 每个负荷点的 n_{pv} 维参数即具体灵敏度值是对其在无功源控制空间^[1]无功电压特性的定量描述。

b. 形成正态云滴。 将 $n-1$ 个节点在无功源控制空间的定量值经逆向云发生器处理, 形成与该节点相对应的正态云滴的具体属性表示, 即 (E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) , 从而完成向云模型的转换。 在云模型中, E_x 表征节点对应云滴归并到相应电压分区的期望度量值; E_n 表征节点对各个电压分区都存在无功耦合, 即模糊性度量值; H_e 表征节点对各电压分区隶属的随机性度量值。

c. 以确定的若干中枢节点 (由步骤 b 也形成相应正态云参数) 为聚类中心或高层次概念的云团, 将由逆向云发生器形成的各正态云滴具体参数输入到 T 云发生器, 生成各节点的相应云滴对于各云团的隶属度 μ_i 。 每个正态云滴根据其隶属度大小聚合到对其隶属度最大的高层次概念云团, 从而完成各节点向各中枢节点正态云滴的聚合。

d. 完成对各个分区的进一步调整, 确定最终分区。 按照平衡机组的实际并网位置归并其分区^[19-21]。 对于初步分区所得可能的孤立节点或者分区中只含负荷节点而没有无功控制机组的情形, 将根据该节点在无功源控制空间与各台机组的相关性灵敏度进行归并。

e. 对完成的分区进行无功储备校验。 定义无功储备裕度为:

$$\beta = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{in}} Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_{Gi}} \right) \times 100\% \quad (28)$$

其中, n_{LD} 、 n_c 分别为分区中负荷节点数与无功控制机组数; Q_i 为分区任一负荷节点的注入无功功率; Q_{Gi} 为分区中发电机节点的无功裕量。取无功功率裕度最少为 15%, 若分区无功裕度未达到标准, 则综合相邻分区无功裕度, 重新调整无功负荷较大节点的分区归属。

4 算例验证

本文选取 IEEE 14、IEEE 30 节点输电网络进行仿真测试, IEEE 14 节点网络有 5 台发电机、14 个节点。IEEE 30 节点网络有 6 台发电机、30 个节点。用 MATLAB2009 软件编写程序。

4.1 对 IEEE 14 节点系统仿真测试

由前述方法, 根据式(5)或者式(7)对全 PQ 节点(除平衡节点外)系统进行注入电流形式潮流计算, 初始的收敛电压值如表 1 所示(表中电压均为标幺值, 后同), 根据该系统电压运行水平较高, 设置中枢点电压约束范围为 $[0.9, 1.05]$ p.u., 则根据其上限 1.05 p.u., 代入式(19)—(27)进行中枢点识别与校验, 表 1 中校验后节点电压为将中枢点电压取上限后的系统电压, 可以看出没有节点越下限 0.9 p.u., 因此该中枢点的确定是合理的。该网络中枢节点为节点 6、7、8。

表 1 IEEE 14 节点系统潮流校验结果及节点云模型生成
Table 1 Power flow verification results and cloud model generation of IEEE 14-bus system

节点号	E_{xi}	E_{ni}	H_{ei}	校正后 节点电压	初始节 点电压
14	0.123 530	0.024 05	0.029 40	0.963 3	1.053
13	0.127 610	0.026 07	0.037 34	0.986 7	1.065
12	0.128 310	0.026 41	0.039 13	0.994 5	1.070
4	0.075 350	0.006 82	0.010 25	0.977 7	1.028
5	0.067 350	0.006 97	0.009 36	0.985 5	1.028
11	0.125 240	0.024 90	0.032 06	0.987 9	1.073
7	0.123 470	0.023 59	0.034 50	1.050 0	1.083
10	0.121 850	0.023 22	0.028 11	0.974 7	1.069
9	0.120 380	0.022 49	0.028 15	0.976 3	1.075
8	0.167 500	0.044 29	0.068 55	1.050 0	1.126
6	0.128 790	0.026 65	0.040 44	1.050 0	1.083
3	0.084 484	0.012 12	0.018 86	0.980 0	1.017
2	0.044 770	0.001 09	0.001 62	1.027 0	1.049

建立无功源控制空间^[2]后, 由逆向云发生器生成的各个节点对应云模型中的正态云滴具体参数(E_{xi} , E_{ni} , H_{ei})如表 1 中所示。确定出系统中枢点, 由云聚类算法完成以各中枢点为云团或中心的聚类软划分, 电压分区结果如表 2 所示。实际分区并不能将 PV 节点完全等同于正的负荷节点形式 PQ 节点, 进一步分析各机组实际并网情况, 将节点 8 并入分区 3, 完成 IEEE 14 节点系统的聚类划分。由于 IEEE 14 节点系统机组无功总量为 95.39 Mvar, 恒定功率无功

表 2 IEEE 14 节点系统中枢点识别及云聚类分区结果
Table 2 Results of pilot node identification and cloud clustering partitioning of IEEE 14-bus system

分区	中枢点	节点号	无功储备裕度 / %
1	8	1, 2, 3, 4, 5	100
2	6	6, 12, 13	100
3	7	7, 8, 9, 10, 11, 14	100

负荷为 73.5 Mvar, 系统无功较为充裕, 根据校正后潮流收敛结果及式(28)计算结果综合考虑, 各分区无功储备裕量取 100%。

表 3 将本文方法与文献[20]方法对 IEEE 14 节点网络分区结果进行比较, 只有节点 11 的分区归属不同, 且本文先通过中枢节点识别已确定分区数, 并通过分区无功校验该分区的合理性。图 2 为 IEEE 14 节点网络最终分区效果图。

表 3 本文方法与文献[20]分区结果比较

Table 3 Comparison of partitioning results between proposed method and method in literature[20]

分区	节点号	
	本文方法	文献[20]方法
1	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5
2	6, 12, 13	6, 11, 12, 13
3	7, 8, 9, 10, 11, 14	7, 8, 9, 10, 14

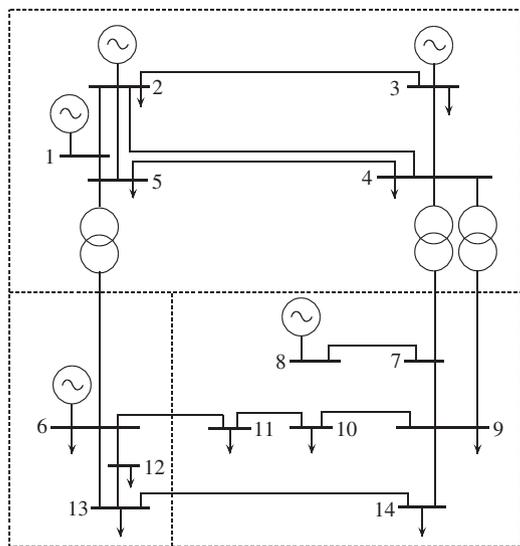


图 2 IEEE 14 节点输电网络最终分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of final partitioning results of IEEE 14-bus system

4.2 对 IEEE 30 节点系统仿真测试

对 IEEE 30 节点网络, 根据表 4 初始潮流计算节点电压水平, 设定约束范围取 $[0.9, 1.02]$ p.u., 则经校验, 判别出的越限节点 2、3、11、13 电压取上限值 1.02 p.u. 后, 所有节点电压均不越下限, 在约束范围内, 从而确定其为中枢节点。在此基础上根据云聚类算法步骤, 完成以节点 2、3、11、13 为中心的分区 4 无功电压划分, 初次划分结果如表 5 所示。值得关注的是, 4 个中枢点中有 3 个是发电厂高压母线, 并

表 4 IEEE 30 节点系统潮流校验结果及节点云模型生成
Table 4 Power flow verification results and cloud model generation of IEEE 30-bus system

节点号	E_{ci}	E_{mi}	H_{ci}	校正后节点电压	初始节点电压
30	0.08731	0.00535	0.01051	0.93845	0.95817
29	0.08731	0.00535	0.01051	0.95031	0.97007
3	0.05443	0.00271	0.00520	1.02000	1.02570
4	0.06545	0.00326	0.00626	1.00260	1.01740
28	0.08218	0.00550	0.01016	0.98139	0.99600
6	0.08007	0.00526	0.00965	0.98729	1.00120
7	0.09669	0.00802	0.01941	0.94784	0.96190
27	0.08731	0.00535	0.01051	0.97083	0.99063
9	0.10445	0.00940	0.02324	0.97240	0.99320
10	0.09690	0.00662	0.01713	0.95888	0.98355
26	0.08882	0.00515	0.01120	0.93326	0.95618
12	0.07760	0.00416	0.00917	0.94319	0.98959
25	0.08882	0.00515	0.01120	0.95176	0.97470
14	0.08002	0.00420	0.00909	0.93204	0.97569
15	0.08202	0.00425	0.009370	0.92965	0.97066
16	0.09143	0.00520	0.014040	0.92728	0.95703
17	0.09526	0.00619	0.016160	0.94367	0.96983
18	0.08722	0.00454	0.011440	0.92661	0.96193
19	0.09029	0.00473	0.013191	0.92836	0.96027
20	0.09191	0.00519	0.014084	0.93505	0.96517
21	0.09584	0.00625	0.016369	0.94595	0.97124
22	0.09551	0.00613	0.016131	0.94660	0.97208
23	0.08597	0.00414	0.010581	0.92823	0.96370
24	0.09125	0.00483	0.013129	0.93586	0.96388
13	0.07976	0.00736	0.017098	1.02000	1.02590
11	0.14605	0.02337	0.053888	1.02000	1.02820
8	0.08745	0.00646	0.013120	0.99021	1.00420
5	0.12002	0.01523	0.036030	0.91429	0.92842
2	0.04244	0.00070	0.001390	1.02000	1.03830

表 5 IEEE 30 节点系统中枢节点识别及云聚类分区结果
Table 5 Results of pilot nodes identification and cloud clustering partitioning of IEEE 30-bus system

分区	中枢点	节点号
1	2	2
2	11	1, 5, 7, 9, 10, 11, 17, 20, 21, 22
3	3	3
4	13	4, 6, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

且出现中枢节点 2、3 孤立的情况,由于节点 2 是发电机节点,可根据其实际并网位置进一步调整分区,中枢节点 3 是枢纽变电站节点,根据其在无功源控制空间^[2]中对各发电机组无功电压灵敏度最大原则,进一步归并到对其无功电压控制最灵敏的发电机组所在分区中。

经调整,将分区 4 整合为分区 2,根据式(28)进行无功储备校验,进一步将分区 1 中无功负荷较重的节点 7、21 整合到分区 2 中,经无功校验,此时两分区无功储备裕度分别达到 52.96% 和 30.97%,满足不低于 15% 的设定要求。表 6 为 IEEE 30 节点网络最终分区结果,图 3 为相应效果图。

表 6 IEEE 30 节点系统最终分区结果

Table 6 Final partitioning results of IEEE 30-bus system

分区	中枢点	节点号	无功储备裕度/%
1	3, 11	1, 3, 5, 9, 10, 11, 17, 20, 22	52.96
2	2, 13	2, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	30.97

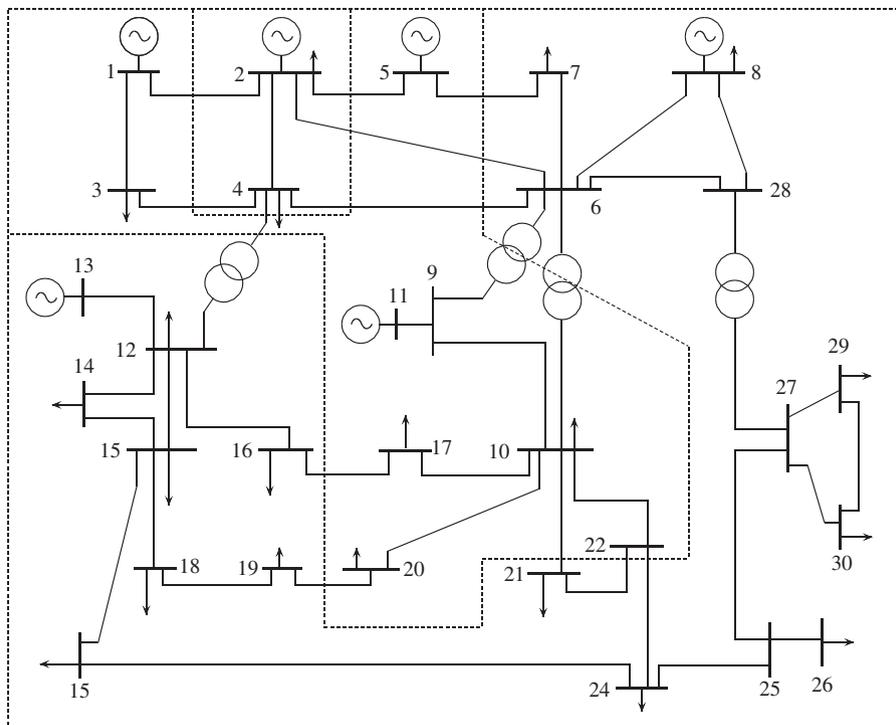


图 3 IEEE 30 节点输电网络最终分区示意图

Fig.3 Schematic diagram of final partitioning results of IEEE 30-bus system

5 结语

本文利用注入电流形式的潮流方程,根据线性灵敏度定性分析,直接通过对全网中枢节点的定量识别,在先确定系统中枢点后以中枢点为无功电压分区中心并引入云模型,建立无功源控制空间,在此基础上由云聚类算法完成所有节点的无功电压分区并进一步整合,对分区结果进行了无功储备裕度校验。通过对 IEEE 14、IEEE 30 节点系统的仿真测试,验证了所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] SANCHI J L, FERNANDEZ, CORTES A, et al. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the Spanish transmission system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 630-635.
- [2] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-39.
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-39.
- [3] 范磊, 陈珩. 二次电压控制研究(二)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 20-23.
FAN Lei, CHEN Heng. Study of secondary voltage control part two pilot bus selection and control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 20-23.
- [4] 陈厚合, 运奕竹, 邢文洋, 等. 基于聚类分析方法的电力系统负荷节点分区策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 47-50.
CHEN Houhe, YUN Yizhu, XING Wenyang, et al. A novel strategy of network partitioning for load node in power systems using spectral clustering[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 47-50.
- [5] 顾全, 黄凯, 范磊, 等. 基于进化策略法的电压无功分区中枢纽点选择[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 79-81.
GU Quan, HUANG Kai, FAN Lei, et al. Pilot bus selection based on evolutionary strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 79-81.
- [6] QUINTANA V H, MUELLER N. Partitioning of power networks and applications to security control[J]. IEEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1991, 138(6): 535-540.
- [7] 陈锐, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 自动电压控制中的中枢母线选择方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 112-116.
CHEN Rui, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Pilot bus selection in automatic voltage control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 112-116.
- [8] 杨柳青, 刘明波, 林舜江. 控制分区中含有多个先导节点的静态电压稳定裕度计算[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1347-1349.
YANG Liuqing, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Computation of static voltage stability margin with multiple pilot buses in a control partition[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1347-1349.
- [9] 康勇, 李华强, 郑武, 等. 基于能量灵敏度矩阵和模糊聚类分析的电压控制分区[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 69-72.
KANG Yong, LI Huaqiang, ZHENG Wu, et al. Voltage control partitioning based on energy sensitivity matrix and fuzzy clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 69-72.
- [10] 王春燕. 基于粒子群优化的二级电压控制分区[D]. 南京: 南京师范大学, 2010.
WANG Chunyan. Particle swarm optimization based algorithm for secondary voltage partition[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010.
- [11] 陈得宇, 沈继红, 张仁忠, 等. 紧急工况下的二级电压控制分区与协同建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 125-127.
CHEN Deyu, SHEN Jihong, ZHANG Renzhong, et al. Partitioning and collaborative modeling of the secondary voltage control to respond to emergency conditions[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1): 125-127.
- [12] 张岩, 张文, 王亮, 等. 基于模糊聚类滚动筛选决策集的电压协调控制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 29-31.
ZHANG Yan, ZHANG Wen, WANG Liang, et al. Coordinated voltage control with CDSRS based on fuzzy clustering analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 29-31.
- [13] 魏震波, 刘俊勇, 程飞. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 166-172.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, CHENG Fei. Fast power network partitioning method in Mvar control space based on community mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 166-172.
- [14] 李如琦, 唐林权, 凌武能, 等. 基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 104-106.
LI Ruqi, TANG Linquan, LING Wuneng, et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 104-106.
- [15] 杭乃善, 姚元玺, 窦婷婷, 等. 基于直角坐标注入电流形式的多平衡节点潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(4): 9-12.
HANG Naishan, YAO Yuanxi, DOU Tingting, et al. An algorithm of multi-balance bus based on rectangular coordinate current influx[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(4): 9-12.
- [16] 付学文. 基于粒云模型的遗传算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
FU Xuwen. Research on genetic algorithm based on cloud model[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [17] 周浪, 徐智, 廖瑞金, 等. 基于云理论和核向量空间模型的电力变压器套管绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1101-1105.
ZHOU Quan, XU Zhi, LIAO Ruijin, et al. Insulation condition assessment of power transformer bushing based on cloud model and kernel vector space model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1101-1105.
- [18] 邓羽, 刘盛和, 张文婷, 等. 广义多维云模型及其在空间聚类中的应用[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1440-1445.
DENG Yu, LIU Shenghe, ZHANG Wenting, et al. Spatial clustering method based on general multidimensional cloud model[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1440-1445.
- [19] 郭鸿毅, 刘明波, 林舜江. 二次电压控制对静态电压稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 20-24.
GUO Hongyi, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Analysis of effects of secondary voltage control on static voltage stability[J]. Auto-

mation of Electric Power Systems, 2011, 35(6):20-24.

[20] 丁晓群, 黄伟, 章文俊, 等. 基于电压控制区的主导节点电压校正方法[J]. 电网技术, 2004, 28(14):44-47.

DING Xiaoqun, HUANG Wei, ZHANG Wenjun, et al. A pilot bus voltage correction method based on voltage control area[J]. Power System Technology, 2004, 28(14):44-47.

[21] ORERO S O, IRVING M R. A genetic algorithm for network partitioning in power system state estimation[C]//UKACC International Conference on Control'96. [S.l.]: IET, 1996:162-165.

作者简介:



成 煜

成 煜(1990—), 男, 甘肃秦安人, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析与计算相关研究(E-mail: chengyuzhifeng1109@126.com);

杭乃善(1949—), 男, 广西南宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统优化计算、电力系统运行与控制及电能质量方面的研究。

Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification

CHENG Yu, HANG Naishan

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Since it is difficult to quantitatively determine the pilot nodes after the traditional clustering-based reactive voltage partitioning, a method is proposed to quantitatively identify the pilot nodes of whole power network before the reactive voltage partitioning, which loosens all PV nodes up to PQ nodes, applies the power flow equations in the form of injecting current to work out the nodes with voltage violation, corrects in turn the voltage-violated node to normal according to its linear sensitivity to the voltages of rest nodes, and determines all pilot nodes by the further power flow calculation verification. The reactive power source control space is built by setting the partition number as the pilot node number and the linear sensitivity of node voltage to its injecting reactive current as the reactive voltage scale. The cloud clustering algorithm is applied to transform the nodes of whole power network from the reactive power source control space to the cloud model and the cloud generator is adopted to realize the clustering-based partitioning with the pilot node as the centre for all nodes of whole power network. The results of simulative test for IEEE 14-bus and IEEE 30-bus systems verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: pilot nodes; linear sensitivity; reactive power source control space; cloud model; voltage partition; voltage control; models; sensitivity analysis; clustering algorithm

(上接第37页 continued from page 37)

Influence of inverter-interfaced distributed generator with low-voltage ride-through capability on short circuit current of distribution network

TAN Huizheng¹, LI Yongli¹, CHEN Xiaolong¹, ZHAO Manyong^{2,3}, LIU Nian², HUANG Weifang^{2,3}

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Power Dispatching Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China; 3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The existing methods of short circuit current calculation for distribution network is no longer applicable due to the large-scale integration of IIDG (Inverter-Interfaced Distributed Generator), which makes the relay protection setting of IIDG-contained distribution network much difficult. The low-voltage ride-through characteristics of IIDG and its control strategy are analyzed, based on which, a universal method of short circuit current calculation is proposed for the distribution network with one or two IIDGs. It makes the IIDG equivalent to a voltage-controlled current-source model contained only in the positive-sequence network, establishes the short circuit current calculation equations by analyzing the equivalent circuit or compound-sequence network of the IIDG-contained distribution network for different types of faults, and deduces the short circuit current calculating formulas. Its correctness is proved by the results of PSCAD simulation. According to the deduced calculating formulas, the general variation rules of short circuit current along with the variation of system parameters and IIDG capacity are analyzed by MATLAB for the IIDG-contained distribution network.

Key words: inverter-interfaced distributed generator; distribution networks; low-voltage ride-through; positive control; short circuit current calculation; fault characteristic analysis