



(21) 申请号 202410957283.2

(22) 申请日 2024.07.17

(71) 申请人 华北电力大学

地址 102206 北京市昌平区回龙观镇北农  
路2号

(72) 发明人 郑乐 郑佳杰 徐辉

(74) 专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

专利代理师 万慧华

(51) Int. Cl.

G06F 18/20 (2023.01)

H02J 3/38 (2006.01)

G06F 17/16 (2006.01)

G06F 17/18 (2006.01)

G06F 17/11 (2006.01)

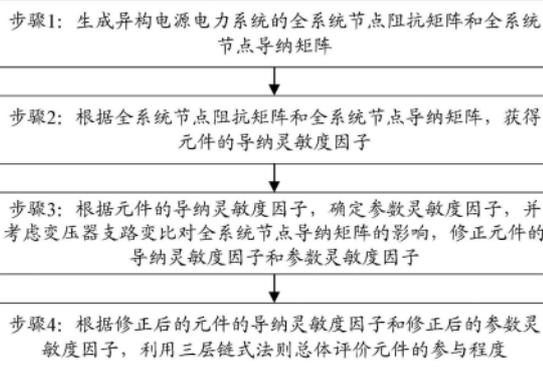
权利要求书4页 说明书11页 附图4页

#### (54) 发明名称

一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法

#### (57) 摘要

本发明公开一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,涉及电力系统稳定控制领域。该方法生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,从而获得元件的导纳灵敏度因子;根据元件的导纳灵敏度因子,确定参数灵敏度因子;考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子;根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度。本发明能够准确地对异构电源电力系统电源或网络元件进行参与分析。



1. 一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,包括:  
 生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵;  
 根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,获得元件的导纳灵敏度因子;  
 根据元件的导纳灵敏度因子,确定参数灵敏度因子,并考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子;  
 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度。

2. 根据权利要求1所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,具体包括:

建立异构电源电力系统的电源节点导纳矩阵为:  $\mathbf{Y}_G = \begin{bmatrix} Y_{G1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & Y_{Gi} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Y_{Gn} \end{bmatrix}$ ; 其中,  $Y_G$  表

示电源节点导纳矩阵,  $Y_{G1}$  表示母线1所连电源的导纳,  $Y_{Gi}$  表示母线i所连电源的导纳,  $Y_{Gn}$  表示母线n所连电源的导纳;

建立异构电源电力系统的网络节点导纳矩阵为:  $\mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} Y_{N11} & \cdots & Y_{N1j} & \cdots & Y_{N1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Ni1} & \cdots & Y_{Nij} & \cdots & Y_{Nin} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Nn1} & \cdots & Y_{Nnj} & \cdots & Y_{Nnn} \end{bmatrix}$ ; 其中,

$Y_N$  表示网络节点导纳矩阵,  $Y_{N11}$  表示母线1的自导纳元素,  $Y_{N1j}$  表示母线1和母线j之间的互导纳元素,  $Y_{N1n}$  表示母线1和母线n之间的互导纳元素,  $Y_{Ni1}$  表示母线i和母线1之间的互导纳元素,  $Y_{Nij}$  表示母线i和母线j之间的互导纳元素,  $Y_{Nin}$  表示母线i和母线n之间的互导纳元素,  $Y_{Nn1}$  表示母线n和母线1之间的互导纳元素,  $Y_{Nnj}$  表示母线n和母线j之间的互导纳元素,  $Y_{Nnn}$  表示母线i的自导纳元素;

以网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,网络中每个母线处的电压变化值作为输出,并利用节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵互逆的关系,获得异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为:  $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ , 全系统节点导纳矩阵为:  $Y = Y_G + Y_N$ ; 其中,  $Z_N$  为网络的节点阻抗矩阵,  $I$  是单位矩阵,  $Z$  表示考虑电源阻抗特性的全系统节点阻抗矩阵,  $Y$  表示考虑电源阻抗特性的全系统节点导纳矩阵。

3. 根据权利要求2所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,以网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,网络中每个母线处的电压变化值作为输出,并利用节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵互逆的关系,获得异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为:  $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ , 全系统节点导纳矩阵为:  $Y = Y_G + Y_N$ , 具体包括:

将网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,则输入为:  $\Delta u = [\Delta I_1 \cdots \Delta I_i \cdots \Delta I_n]^T$ ; 其中,  $\Delta u$  为输入,  $\Delta I_1$  为母线1处注入电流的扰动值,  $\Delta I_i$  为母线i处注入电流的扰动

值,  $\Delta I_n$  为母线n处注入电流的扰动值;

以网络每个母线处的电压变化值作为输出, 则输出为:  $\Delta y = [\Delta U_1 \cdots \Delta U_i \cdots \Delta U_n]^T$ ; 其中,  $\Delta y$  为输出,  $\Delta U_1$  为母线1处的电压变化值,  $\Delta U_i$  为母线i处的电压变化值,  $\Delta U_n$  为母线n处的电压变化值;

根据输入和输出, 利用闭环公式获得输入输出传递函数矩阵为:  $\Delta y = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N \Delta u$ ;

根据输入输出传递函数矩阵, 确定异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为:  $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ , 全系统节点导纳矩阵为:  $Y = Y_G + Y_N$ 。

4. 根据权利要求1所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法, 其特征在于, 根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵, 获得元件的导纳灵敏度因子, 具体包括:

根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵, 获得模态对系统中电源或网络元件的导纳取偏导数的偏导公式为:  $\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \lambda}{\partial Y_{ij}} \cdot \frac{\partial Y_{ij}}{\partial y} \right) = -\text{tr}(\text{Res}_\lambda Z \cdot \frac{\partial Y}{\partial y})$ ; 其中,  $\frac{\partial \lambda}{\partial y}$  表示模态 $\lambda$

对电源或网络元件的导纳 $y$ 取偏导数,  $Y_{ij}$  表示考虑电源阻抗特性的节点导纳矩阵 $Y$ 中母线i和母线j之间的互导纳,  $\text{tr}()$  表示取矩阵的迹,  $\text{Res}_\lambda Z$  表示对全系统节点阻抗矩阵 $Z$ 在模态 $\lambda$ 处取留数;

将所述偏导公式展开, 获得偏导公式的展开式为:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{导纳元件并联母线} \\ (-\text{Res}_\lambda Z_{ii} - \text{Res}_\lambda Z_{jj} & ; \text{其中, } Z_{ii} \text{ 表示母线} i \text{ 的自导纳元素, } Z_{jj} \\ +\text{Res}_\lambda Z_{ij} + \text{Res}_\lambda Z_{ji} & , \text{导纳元件串联母线} i \text{、母线} j \end{cases}$$

表示母线j的自导纳元素,  $Z_{ji}$  为母线j和母线i之间的阻抗,  $Z_{ij}$  为母线i和母线j之间的阻抗;  $\text{Res}_\lambda Z_{ii}$  表示对 $Z_{ii}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数,  $\text{Res}_\lambda Z_{jj}$  表示对 $Z_{jj}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数,  $\text{Res}_\lambda Z_{ij}$  表示对 $Z_{ij}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数,  $\text{Res}_\lambda Z_{ji}$  表示对 $Z_{ji}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数;

根据偏导公式的展开式, 获得元件的导纳灵敏度因子为:  $s_{\lambda, y} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right)^*$ ; 其中,  $s_{\lambda, y}$  为元件的导纳灵敏度因子, \*表示取共轭转置。

5. 根据权利要求1所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法, 其特征在于, 参数灵敏度因子的计算公式为:

$$s_{\lambda, \rho} = \left\langle s_{\lambda, y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle;$$

其中,  $s_{\lambda, \rho}$  为参数灵敏度因子,  $s_{\lambda, y}$  为元件的导纳灵敏度因子,  $\frac{\partial y}{\partial \rho}$  为元件导纳对参数的灵敏度信息,  $\langle, \rangle$  表示Frobenius内积。

6. 根据权利要求4所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法, 其特征在于, 考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响, 修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子, 具体包括:

考虑变压器支路变比对所述偏导公式的影响, 修正偏导公式的展开式为:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{导纳元件并联母线} i \\ -\text{Res}_\lambda \left( \frac{Z_{ii}}{k^2} + Z_{jj} - \frac{Z_{ij}}{k} - \frac{Z_{ji}}{k} \right) & , \text{导纳元件串联母线} i \text{、母线} j \end{cases}; \text{其中,} k \text{为变压器变比;}$$

根据修正后的偏导公式的展开式,修正元件的导纳灵敏度因子;

根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,利用公式  $s'_{\lambda,\rho} = \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ,修正参数灵敏度因子;

其中,  $s'_{\lambda,\rho}$  为修正后的参数灵敏度因子,  $s'_{\lambda,y}$  为修正后的元件的导纳灵敏度因子,  $\frac{\partial y}{\partial \rho}$  为元件导纳对参数的灵敏度信息,  $\frac{\partial y}{\partial \rho} = \frac{y_{\Delta\rho} - y}{\Delta\rho}$ ,  $\Delta\rho$  为参数  $\rho$  的小扰动,  $y_{\Delta\rho}$  为参数  $\rho$  变化后电源或网络元件的导纳  $y$  的变化结果。

7. 根据权利要求1所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子,之后还包括:

根据修正后的参数灵敏度因子,依据公式  $\Delta\lambda_{pr} = s'_{\lambda,\rho} \cdot \rho \cdot 5\%$ ,获得参数变化5%引起的模态预测变化量;其中,  $\Delta\lambda_{pr}$  为参数  $\rho$  变化5%引起的模态预测变化量,  $s'_{\lambda,\rho}$  为修正后的参数灵敏度因子;

确定参数变化5%引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差。

8. 根据权利要求7所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,所述误差的确定公式为:

$$\text{Error} = \frac{|\Delta\lambda_{pr} - \Delta\lambda|}{|\Delta\lambda_{pr}|};$$

其中,Error为参数变化引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差,  $\Delta\lambda_{pr}$  为参数  $\rho$  变化5%引起的模态预测变化量,  $\Delta\lambda$  为参数改变后的模态实际变化量。

9. 根据权利要求1所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,其特征在于,根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度,具体包括:

定义三层链式法则的第一层为:  $\Delta\lambda_{\max} = \sqrt{\sigma_2^2 + \omega_2^2}$ ;其中,  $\Delta\lambda_{\max}$  为元件的导纳变化引起模态相应的最大变化量,  $\sigma_2$  和  $\omega_2$  分别为三层链式法则的第二层的实部和虚部;

根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,定义三层链式法则的第二层为:  $\sigma_2 + j\omega_2 = \langle s'_{\lambda,y}, y \rangle$ ;其中,  $s'_{\lambda,y}$  为修正后的元件的导纳灵敏度因子,  $y$  为电源或网络元件的导纳,  $\langle, \rangle$  表示Frobenius内积;

根据修正后的参数灵敏度因子,定义三层链式法则的第三层为:  $\sigma_3 + j\omega_3 = \left\langle s'_{\lambda,\rho}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ;

其中,  $\left\langle s'_{\lambda,\rho}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$  为修正后的参数灵敏度因子,  $\sigma_3$  和  $\omega_3$  分别为三层链式法则的第三层的实部和虚部;

利用三层链式法则的第一层、第二层和第三层总体评价元件的参与程度。

10. 根据权利要求9所述的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法, 其特征在于, 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子, 利用三层链式法则总体评价元件的参与程度, 之后还包括:

根据修正后的参数灵敏度因子, 以增强异构电源电力系统的扰动稳定性为目标, 确定参数调整方向。

## 一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统稳定控制领域,特别是涉及一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法。

### 背景技术

[0002] 随着可再生能源在全球能源结构中的比例不断增加,变流器接口电源(converter-interfaced generation, CIG)在电力系统中的渗透率显著提高,这给电力系统带来了新的稳定性挑战。在过去10年中,高渗透率的变流器给实际电网带来了多起次同步振荡事件。与传统电力系统的同步机相比,变流器的功角、频率和电压动态发生在更宽和更快的时间尺度内,这会进一步带来新的电磁模式。当变流器渗透率到达100%时,电力系统的动态特性将产生根本性变化。

[0003] 目前接入交流电力系统的变流器主要分为构网型(grid-forming, GFM)变流器和跟网型(grid-following, GFL)变流器,它们在控制方式上与同步机具有相似之处,但也存在一些重要的差异,这使得分析异构电源电力系统稳定性需要新的建模框架。阻抗是一个可以体现电源动态特性的属性,有相关学者基于广义奈奎斯特稳定判据提出了对多设备电力系统小信号稳定性的判定方法。除此之外集成子系统的阻抗网络变换方法也可以实现对稳定性的判定,并且可以简化生成网络矩阵以进行稳定性分析的复杂度。还有相关学者提出了一种正模态阻尼的稳定性准则,但是这仅适用于弱阻尼的振荡模态。将坐标变换的动力学嵌入阻抗模型中的方法,实现了交流电网整体阻抗建模。针对多变流器系统,这些方法都只能判定系统是否稳定,并不能定位对系统不稳定影响最大的元件。

[0004] 阻抗模型参与分析方法提出了导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子,导纳灵敏度因子可以公平地对电源和网络元件导纳进行参与分析,从而实现全系统的阻抗模型参与分析。此外相关文献进一步将阻抗模型参与分析方法应用到交直流混合系统中,并说明了该方法在交直流混合系统中进行直接和间接分析的等价性。但是阻抗模型参与分析方法在某些场景应用下误差很大,需要讨论造成误差的影响因素,并对该方法的理论计算过程进行修正。因此一种基于阻抗模型的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法将此实现。

[0005] 现有研究主要从电源或网络元件导纳灵敏度的参与分析结果指导如何定位对系统模态参与程度最大的元件,由于之前研究基于柯西不等式得到的最大值以评价元件总体参与程度出现误判现象,则会使得对系统重要元件的错误定位。并且现有阻抗模型模态分析方法对网络元件的模态分析只针对线路元件,变压器支路由于变比会对阻抗模型模态分析结果产生较大的数值误差,由此采用的错误参数调整措施可能会导致系统小信号稳定性减弱。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,

可准确地对异构电源电力系统电源或网络元件进行参与分析。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0008] 一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,包括:生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵;根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,获得元件的导纳灵敏度因子;根据元件的导纳灵敏度因子,确定参数灵敏度因子,并考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子;根据修正后的参数灵敏度因子,获得参数变化引起的模态预测变化量;确定参数变化引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差;根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度。

[0009] 可选地,生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,具体包括:

[0010] 建立异构电源电力系统的电源节点导纳矩阵为:  $\mathbf{Y}_G = \begin{bmatrix} Y_{G1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & Y_{Gi} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Y_{Gn} \end{bmatrix}$ ; 其

中, $Y_G$ 表示电源节点导纳矩阵, $Y_{G1}$ 表示母线1所连电源的导纳, $Y_{Gi}$ 表示母线i所连电源的导纳, $Y_{Gn}$ 表示母线n所连电源的导纳;

[0011] 建立异构电源电力系统的网络节点导纳矩阵为:  $\mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} Y_{N11} & \cdots & Y_{N1j} & \cdots & Y_{N1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Ni1} & \cdots & Y_{Nij} & \cdots & Y_{Nin} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Nn1} & \cdots & Y_{Nnj} & \cdots & Y_{Nnn} \end{bmatrix}$ ;

其中, $Y_N$ 表示网络节点导纳矩阵, $Y_{N11}$ 表示母线1的自导纳元素, $Y_{N1j}$ 表示母线1和母线j之间的互导纳元素, $Y_{N1n}$ 表示母线1和母线n之间的互导纳元素, $Y_{Ni1}$ 表示母线i和母线1之间的互导纳元素, $Y_{Nij}$ 表示母线i和母线j之间的互导纳元素, $Y_{Nin}$ 表示母线i和母线n之间的互导纳元素, $Y_{Nn1}$ 表示母线n和母线1之间的互导纳元素, $Y_{Nnj}$ 表示母线n和母线j之间的互导纳元素, $Y_{Nnn}$ 表示母线i的自导纳元素;

[0012] 以网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,网络中每个母线处的电压变化值作为输出,并利用节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵互逆的关系,获得异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为: $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ ,全系统节点导纳矩阵为: $Y = Y_G + Y_N$ ;其中, $Z_N$ 为网络的节点阻抗矩阵,I是单位矩阵,Z表示考虑电源阻抗特性的全系统节点阻抗矩阵,Y表示考虑电源阻抗特性的全系统节点导纳矩阵。

[0013] 可选地,以网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,网络中每个母线处的电压变化值作为输出,并利用节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵互逆的关系,获得异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为: $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ ,全系统节点导纳矩阵为: $Y = Y_G + Y_N$ ,具体包括:

[0014] 将网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入,则输入为: $\Delta u = [\Delta I_1 \cdots \Delta I_i \cdots$

$\Delta I_n]^T$ ;其中, $\Delta u$ 为输入, $\Delta I_1$ 为母线1处注入电流的扰动值, $\Delta I_i$ 为母线*i*处注入电流的扰动值, $\Delta I_n$ 为母线*n*处注入电流的扰动值;

[0015] 以网络每个母线处的电压变化值作为输出,则输出为: $\Delta y = [\Delta U_1 \cdots \Delta U_i \cdots \Delta U_n]^T$ ;其中, $\Delta y$ 为输出, $\Delta U_1$ 为母线1处的电压变化值, $\Delta U_i$ 为母线*i*处的电压变化值, $\Delta U_n$ 为母线*n*处的电压变化值;

[0016] 根据输入和输出,利用闭环公式获得输入输出传递函数矩阵为: $\Delta y = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N \Delta u$ ;

[0017] 根据输入输出传递函数矩阵,确定异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵为: $Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1}$ ,全系统节点导纳矩阵为: $Y = Y_G + Y_N$ 。

[0018] 可选地,根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,获得元件的导纳灵敏度因子,具体包括:

[0019] 根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,获得模态对系统中电源或网络

元件的导纳取偏导数的偏导公式为: $\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \lambda}{\partial Y_{ij}} \cdot \frac{\partial Y_{ij}}{\partial y} \right) = -\text{tr}(\text{Res}_\lambda Z \cdot \frac{\partial Y}{\partial y})$ ;其中, $\frac{\partial \lambda}{\partial y}$ 表示模

态 $\lambda$ 对电源或网络元件的导纳 $y$ 取偏导数, $Y_{ij}$ 表示考虑电源阻抗特性的节点导纳矩阵 $Y$ 中母线*i*和母线*j*之间的互导纳, $\text{tr}()$ 表示取矩阵的迹, $\text{Res}_\lambda Z$ 表示对全系统节点阻抗矩阵 $Z$ 在模态 $\lambda$ 处取留数;

[0020] 将所述偏导公式展开,获得偏导公式的展开式为:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{导纳元件并联母线} \\ (-\text{Res}_\lambda Z_{ii} - \text{Res}_\lambda Z_{jj}) & ; \text{其中, } Z_{ii} \text{ 表示母线 } i \text{ 的自导纳元素, } Z_{jj} \\ +\text{Res}_\lambda Z_{ij} + \text{Res}_\lambda Z_{ji} & , \text{导纳元件串联母线 } i \text{、母线 } j \end{cases}$$

表示母线*j*的自导纳元素, $Z_{ji}$ 为母线*j*和母线*i*之间的阻抗, $Z_{ij}$ 为母线*i*和母线*j*之间的阻抗; $\text{Res}_\lambda Z_{ii}$ 表示对 $Z_{ii}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{jj}$ 表示对 $Z_{jj}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{ij}$ 表示对 $Z_{ij}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{ji}$ 表示对 $Z_{ji}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数;

[0021] 根据偏导公式的展开式,获得元件的导纳灵敏度因子为: $s_{\lambda,y} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right)^*$ ;其中, $s_{\lambda,y}$ 为元件的导纳灵敏度因子,\*表示取共轭转置。

[0022] 可选地,参数灵敏度因子的计算公式为: $s_{\lambda,\rho} = \left\langle s_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ;其中, $s_{\lambda,\rho}$ 为参数灵敏度因子, $s_{\lambda,y}$ 为元件的导纳灵敏度因子, $\frac{\partial y}{\partial \rho}$ 为元件导纳对参数的灵敏度信息, $\langle, \rangle$ 表示Frobenius内积。

[0023] 可选地,考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子,具体包括:

[0024] 考虑变压器支路变比对所述偏导公式的影响,修正偏导公式的展开式为:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{导纳元件并联母线} \\ -\text{Res}_\lambda \left( \frac{Z_{ii}}{k^2} + Z_{jj} - \frac{Z_{ij}}{k} - \frac{Z_{ji}}{k} \right) & , \text{导纳元件串联母线 } i \text{、母线 } j \end{cases}; \text{其中, } k \text{ 为变压器变比};$$

[0025] 根据修正后的偏导公式的展开式,修正元件的导纳灵敏度因子;

[0026] 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,利用公式  $s'_{\lambda,\rho} = \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ,修正参数灵敏度因子;

其中, $s'_{\lambda,\rho}$ 为修正后的参数灵敏度因子, $s'_{\lambda,y}$ 为修正后的元件的导纳灵敏度因子, $\frac{\partial y}{\partial \rho}$ 为元件导纳对参数的灵敏度信息, $\frac{\partial y}{\partial \rho} = \frac{y_{\Delta\rho} - y}{\Delta\rho}$ , $\Delta\rho$ 为参数 $\rho$ 的小扰动, $y_{\Delta\rho}$ 为参数 $\rho$ 变化后电源或网络元件的导纳 $y$ 的变化结果。

[0027] 可选地,考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子,之后还包括:根据修正后的参数灵敏度因子,依据公式  $\Delta\lambda_{pr} = s'_{\lambda,\rho} \cdot \rho \cdot 5\%$ ,获得参数变化5%引起的模态预测变化量;其中, $\Delta\lambda_{pr}$ 为参数 $\rho$ 变化5%引起的模态预测变化量, $s'_{\lambda,\rho}$ 为修正后的参数灵敏度因子;确定参数变化5%引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差。

[0028] 可选地,所述误差的确定公式为:  $\text{Error} = \frac{|\Delta\lambda_{pr} - \Delta\lambda|}{|\Delta\lambda_{pr}|}$ ;其中,Error为参数变化引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差, $\Delta\lambda_{pr}$ 为参数 $\rho$ 变化5%引起的模态预测变化量, $\Delta\lambda$ 为参数改变后的模态实际变化量。

[0029] 可选地,根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度,具体包括:

[0030] 定义三层链式法则的第一层为:  $\Delta\lambda_{\max} = \sqrt{\sigma_2^2 + \omega_2^2}$ ;其中, $\Delta\lambda_{\max}$ 为元件的导纳变化引起模态相应的最大变化量, $\sigma_2$ 和 $\omega_2$ 分别为三层链式法则的第二层的实部和虚部;

[0031] 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,定义三层链式法则的第二层为:  $\sigma_2 + j\omega_2 = \langle s'_{\lambda,y}, y \rangle$ ;其中, $s'_{\lambda,y}$ 为修正后的元件的导纳灵敏度因子, $y$ 为电源或网络元件的导纳, $\langle, \rangle$ 表示Frobenius内积;

[0032] 根据修正后的参数灵敏度因子,定义三层链式法则的第三层为:

$\sigma_3 + j\omega_3 = \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ;其中, $\left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ 为修正后的参数灵敏度因子, $\sigma_3$ 和 $\omega_3$ 分别为三层链式法则的第三层的实部和虚部;

[0033] 利用三层链式法则的第一层、第二层和第三层总体评价元件的参与程度。

[0034] 可选地,根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度,之后还包括:根据修正后的参数灵敏度因子,以增强异构电源电力系统的扰动稳定性为目标,确定参数调整方向。

[0035] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0036] 本发明公开了一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子,进一步地根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度,有效解决了不稳定元件判定错误的问题,能够准确地对异构电源电力系统电源或网络元件进行参与分析。

## 附图说明

[0037] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0038] 图1为本发明实施例提供的一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法的流程示意图。

[0039] 图2为本发明实施例提供的异构电源电力系统的结构示意图。

[0040] 图3为本发明实施例提供的理想变压器支路示意图。

[0041] 图4为本发明实施例提供的改造IEEE14母线系统示意图。

[0042] 图5为本发明实施例提供的改造IEEE14母线系统模态分布示意图。

[0043] 图6为本发明实施例提供的模态1的三层链式法则第一层和第二层计算结果示意图。

[0044] 图7为本发明实施例提供的模态2的三层链式法则第一层和第二层计算结果示意图。

[0045] 图8为本发明实施例提供的模态3的三层链式法则第一层和第二层计算结果示意图。

[0046] 图9为本发明实施例提供的模态4的三层链式法则第一层和第二层计算结果示意图。

[0047] 图10为本发明实施例提供的模态2、模态3和模态4的三层链式法则第一层修正结果示意图。

## 具体实施方式

[0048] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0049] 本发明要解决的技术问题是阻抗模型参与分析方法在变压器元件参与分析的数值误差和评价元件参与程度的误判,具体为:根据变压器变比的误差影响和阻抗模型参与分析方法总体评价元件参与程度的误判结果,需要对阻抗模型参与分析方法做进一步的修正。本发明的目的是提出基于阻抗模型的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,准确地对异构电源电力系统电源或网络元件进行参与分析。

[0050] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0051] 如图1所示,本实施例中的一种基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,包括以下步骤1至步骤7。

[0052] 步骤1:生成异构电源电力系统的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵。

[0053] (一) 建立电源和网络元件的阻抗模型。

[0054] 建立异构电源电力系统小信号模型,分别对其电源和电力网络进行阻抗建模。

[0055] 电源的小信号模型既可以通过状态方程推导得到,同时也可以通过测量得到。值得注意的是,在多机电力系统阻抗建模中,通过状态方程推导的各个电源阻抗模型需要保证所有电源的坐标系对齐。 $Y_{Gi}$ 表示母线i所连电源的导纳:

$$[0056] \quad Y_{Gi} = Z_{Gi}^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{Gi}^{dd} & Y_{Gi}^{dq} \\ Y_{Gi}^{qd} & Y_{Gi}^{qq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0057] 其中 $Z_{Gi}$ 表示母线i所连电源的阻抗模型, $Y_{Gi}^{dd}$ 、 $Y_{Gi}^{dq}$ 、 $Y_{Gi}^{qd}$ 和 $Y_{Gi}^{qq}$ 分别是dq旋转坐标系的对应元素。如果母线i处没有电源,有 $Y_{Gi}=0$ 。

[0058] 由各个电源阻抗模型可以得到系统的电源导纳矩阵:

$$[0059] \quad Y_G = \begin{bmatrix} Y_{G1} & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & Y_{Gi} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & Y_{Gn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0060] 其中 $Y_G$ 表示系统电源的导纳矩阵。 $Y_{G1}$ 表示母线1所连电源的导纳, $Y_{Gi}$ 表示母线i所连电源的导纳, $Y_{Gn}$ 表示母线n所连电源的导纳。

[0061] 对电力网络建立网络节点导纳矩阵 $Y_N$ :

$$[0062] \quad Y_N = \begin{bmatrix} Y_{N11} & \cdots & Y_{N1j} & \cdots & Y_{N1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Ni1} & \cdots & Y_{Nij} & \cdots & Y_{Nin} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{Nn1} & \cdots & Y_{Nnj} & \cdots & Y_{Nnn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0063] 其中 $Y_{Nij}$ 表示母线i和j之间的互导纳元素, $Y_{Nii}$ 表示母线i的自导纳元素。 $Y_{N11}$ 表示母线1的自导纳元素, $Y_{N1j}$ 表示母线1和母线j之间的互导纳元素, $Y_{N1n}$ 表示母线1和母线n之间的互导纳元素, $Y_{Ni1}$ 表示母线i和母线1之间的互导纳元素, $Y_{Nij}$ 表示母线i和母线j之间的互导纳元素, $Y_{Nin}$ 表示母线i和母线n之间的互导纳元素, $Y_{Nn1}$ 表示母线n和母线1之间的互导纳元素, $Y_{Nnj}$ 表示母线n和母线j之间的互导纳元素, $Y_{Nnn}$ 表示母线n的自导纳元素。

[0064] (二)生成全系统节点阻抗矩阵。

[0065] 异构电源电力系统的结构如图2所示。考虑取网络中每个母线处注入电流的扰动值作为输入:

$$[0066] \quad \Delta u = [\Delta I_1 \cdots \Delta I_i \cdots \Delta I_n]^T \quad (4)$$

[0067] 其中 $\Delta I_i$ 是母线i的注入电流扰动值。

[0068] 以网络每个母线处的电压变化值 $\Delta y$ 作为输出:

$$[0069] \quad \Delta y = [\Delta U_1 \cdots \Delta U_i \cdots \Delta U_n]^T \quad (5)$$

[0070] 其中 $\Delta U_i$ 是母线i处的电压变化值。

[0071] 利用闭环公式可得输入输出传递函数矩阵为:

$$[0072] \quad \Delta y = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N \Delta u \quad (6)$$

[0073] 其中 $Z_N = Y_N^{-1}$ 是网络节点阻抗矩阵,I是单位矩阵。

[0074] 由此可得整个系统的传递函数矩阵为:

$$[0075] \quad Z = (I + Z_N Y_G)^{-1} Z_N = (Y_G + Y_N)^{-1} = Y^{-1} \quad (7)$$

[0076] 其中Z和Y是考虑电源阻抗特性的全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵。全系统节点导纳矩阵为： $Y=Y_G+Y_N$ 。

[0077] 步骤2:根据全系统节点阻抗矩阵和全系统节点导纳矩阵,获得元件的导纳灵敏度因子。

[0078] 模态 $\lambda$ 对系统中某个电源或网络元件的导纳y取偏导数得:

$$[0079] \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \lambda}{\partial Y_{ij}} \cdot \frac{\partial Y_{ij}}{\partial y} \right) = -\text{tr}(\text{Res}_\lambda Z \cdot \frac{\partial Y}{\partial y}) \quad (8)$$

[0080] 其中 $\frac{\partial \lambda}{\partial y}$ 表示模态 $\lambda$ 对电源或网络元件的导纳y取偏导数, $Y_{ij}$ 表示全系统节点导纳矩阵Y中母线i和母线j之间的互导纳。 $\text{tr}()$ 表示取矩阵的迹。 $\text{Res}_\lambda Z$ 表示对矩阵Z在模态 $\lambda$ 处取留数,这可以通过有理近似从频谱中识别出来。

[0081] 上式展开可得:

$$[0082] \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{导纳元件并联母线} \\ (-\text{Res}_\lambda Z_{ii} - \text{Res}_\lambda Z_{jj} \\ + \text{Res}_\lambda Z_{ij} + \text{Res}_\lambda Z_{ji}) & , \text{导纳元件串联母线} i、\text{母线} j \end{cases} \quad (9)$$

[0083] 其中, $Z_{ii}$ 表示母线i的自导纳元素, $Z_{jj}$ 表示母线j的自导纳元素, $Z_{ji}$ 为母线j和母线i之间的阻抗, $Z_{ij}$ 为母线i和母线j之间的阻抗。 $\text{Res}_\lambda Z_{ii}$ 表示对 $Z_{ii}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{jj}$ 表示对 $Z_{jj}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{ij}$ 表示对 $Z_{ij}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数, $\text{Res}_\lambda Z_{ji}$ 表示对 $Z_{ji}$ 在模态 $\lambda$ 处取留数。

[0084] 定义y的导纳灵敏度因子为:

$$[0085] \quad s_{\lambda,y} = \left( \frac{\partial \lambda}{\partial y} \right)^* \quad (10)$$

[0086] 其中 $s_{\lambda,y}$ 为元件的导纳灵敏度因子,\*表示取共轭转置。

[0087] 则有:

$$[0088] \quad \Delta \lambda = \langle s_{\lambda,y}, \Delta y \rangle \quad (11)$$

[0089] 其中 $\langle, \rangle$ 表示Frobenius内积,该式描述了系统中某个元件的导纳变化引起模态相应的变化量。

[0090] 步骤3:根据元件的导纳灵敏度因子,确定参数灵敏度因子,并考虑变压器支路变比对全系统节点导纳矩阵的影响,修正元件的导纳灵敏度因子和参数灵敏度因子。

[0091] 如果考虑由导纳y中参数 $\rho$ 引起的变化,则有参数灵敏度因子:

$$[0092] \quad s_{\lambda,\rho} = \left\langle s_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle \quad (12)$$

[0093] 其中, $s_{\lambda,\rho}$ 为参数灵敏度因子, $s_{\lambda,y}$ 为元件的导纳灵敏度因子, $\frac{\partial y}{\partial \rho}$ 为元件导纳对参数的灵敏度信息。参数 $\rho$ 可以是描述导纳y动态方程的任一参数。参数 $\rho$ 变化引起的模态变化量为:

$$[0094] \quad \Delta \lambda = s_{\lambda,\rho} \cdot \Delta \rho \quad (13)$$

[0095] 变压器支路变比会给阻抗模型模态分析方法带来较大的误差。需要对计算过程进行修正。考虑母线i和母线j之间的理想变压器支路,变比k在母线i侧。理想变压器支路如图

3所示。

[0096] 该理想变压器支路给全系统节点导纳矩阵的贡献为：

$$[0097] \quad \begin{bmatrix} \Delta I_i \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = y \begin{bmatrix} \frac{1}{k^2} & -\frac{1}{k} \\ -\frac{1}{k} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta U_j \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0098] 变压器变比k会对造成式(8)影响,因此需要修正式(9)中串联支路的结果:

$$[0099] \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} = -\text{Res}_\lambda \left( \frac{Z_{ii}}{k^2} + Z_{jj} - \frac{Z_{ij}}{k} - \frac{Z_{ji}}{k} \right) \quad (15)$$

[0100] 即,修正偏导公式的展开式为:

$$[0101] \quad \frac{\partial \lambda}{\partial y} = \begin{cases} -\text{Res}_\lambda Z_{ii} & , \text{ 导纳元件并联母线 } i \\ -\text{Res}_\lambda \left( \frac{Z_{ii}}{k^2} + Z_{jj} - \frac{Z_{ij}}{k} - \frac{Z_{ji}}{k} \right) & , \text{ 导纳元件串联母线 } i \text{、母线 } j \end{cases}$$

[0102] 根据修正后的偏导公式的展开式,修正元件的导纳灵敏度因子;

[0103] 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,利用公式  $s'_{\lambda,\rho} = \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle$ ,修正参数灵敏度因子;

其中,  $s'_{\lambda,\rho}$  为修正后的参数灵敏度因子,  $s'_{\lambda,y}$  为修正后的元件的导纳灵敏度因子,  $\frac{\partial y}{\partial \rho}$  为

元件导纳对参数的灵敏度信息,  $\frac{\partial y}{\partial \rho} = \frac{y_{\Delta\rho} - y}{\Delta\rho}$ ,  $\Delta\rho$  为参数  $\rho$  的小扰动,  $y_{\Delta\rho}$  为参数  $\rho$  变化后电源或网络元件的导纳  $y$  的变化结果。

[0104] 步骤3之后还可以进行误差分析,修正误差,具体为:

[0105] 根据修正后的参数灵敏度因子,获得参数变化引起的模态预测变化量。

[0106] 参数  $\rho$  变化5%引起的模态预测变化量为:

$$[0107] \quad \Delta \lambda_{pr} = s'_{\lambda,\rho} \cdot \rho \cdot 5\% \quad (16)$$

[0108] 其中,  $\Delta \lambda_{pr}$  为参数  $\rho$  变化5%引起的模态预测变化量,  $s'_{\lambda,\rho}$  为修正后的参数灵敏度因子。

[0109] 确定参数变化引起的模态预测变化量和模态实际变化量的误差。

[0110] 参数改变后系统实际变化值为  $\Delta \lambda$ , 则预测值和实际值的误差Error为:

$$[0111] \quad \text{Error} = \frac{|\Delta \lambda_{pr} - \Delta \lambda|}{|\Delta \lambda_{pr}|} \quad (17)$$

[0112] 步骤4:根据修正后的元件的导纳灵敏度因子和修正后的参数灵敏度因子,利用三层链式法则总体评价元件的参与程度。

[0113] 使用三层链式法则对系统各个元件进行不同透明度的模态分析。式(11)使用柯西不等式放缩得:

$$[0114] \quad \Delta \lambda_{\max} = ||s_{\lambda,y}|| \cdot ||\Delta y|| = \varepsilon ||s_{\lambda,y}|| \cdot ||y|| \quad (18)$$

[0115] 其中  $||\cdot||$  表示Frobenius范数,  $\varepsilon$  表示  $y$  的变化比例,取值一般较小。

[0116] 则  $||s_{\lambda,y}|| \cdot ||y||$  被定义为阻抗模型模态分析方法的第一层,用以衡量  $y$  对模态  $\lambda$  可能的总体参与程度。

[0117] 第二层和第三层为:

$$[0118] \quad \sigma_2 + j\omega_2 = \langle s_{\lambda,y}, y \rangle \quad (19)$$

$$[0119] \quad \sigma_3 + j\omega_3 = \left\langle s_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle \quad (20)$$

[0120] 其中 $\sigma_2$ 和 $\omega_2$ 分别是第二层的实部和虚部, $\sigma_3$ 和 $\omega_3$ 分别是第二层的实部和虚部。

[0121] 第二层和第三层分别从元件和参数的角度描述了对模态的参与程度。三层分析法的第一层得到系统哪些元件可能有很大的参与度,第二层得到元件对该模态阻尼(实部)和自然振荡频率(虚部)的影响,第三层相比于第二层需要元件对参数的灵敏度信息,从而可以分析具体参数对模态的影响。

[0122] 从信息获取的角度来说,第一层和第二层用到的信息是相同的。因此通过柯西不等式放缩的方式得到的第一层,这用于整体衡量所有元件的参与程度是不合适的。这里重新定义用于衡量所有元件的参与程度的第一层为:

$$[0123] \quad \Delta\lambda_{\max} = \sqrt{\sigma_2^2 + \omega_2^2} \quad (21)$$

[0124] 其中, $\Delta\lambda_{\max}$ 为元件的导纳变化引起模态相应的最大变化量。

[0125] 根据修正后的元件的导纳灵敏度因子,定义三层链式法则的第二层为: $\sigma_2 + j\omega_2 = \langle s'_{\lambda,y}, y \rangle$ ;其中, $s'_{\lambda,y}$ 为修正后的元件的导纳灵敏度因子。

[0126] 根据修正后的参数灵敏度因子,定义三层链式法则的第三层为:

$$\sigma_3 + j\omega_3 = \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle; \text{其中,} \left\langle s'_{\lambda,y}, \frac{\partial y}{\partial \rho} \right\rangle \text{为修正后的参数灵敏度因子。}$$

[0127] 利用三层链式法则的第一层、第二层和第三层总体评价元件的参与程度。

[0128] 步骤4之后还可以调整关键元件参数使异构电源电力系统稳定:

[0129] 由元件导纳对其内部参数的灵敏度信息 $\partial y / \partial \rho$ :

$$[0130] \quad \frac{\partial y}{\partial \rho} = \frac{y_{\Delta\rho} - y}{\Delta\rho} \quad (22)$$

[0131] 其中 $\Delta\rho$ 是元件参数 $\rho$ 的小扰动, $y_{\Delta\rho}$ 是元件参数 $\rho$ 变化后导纳 $y$ 的变化结果。将式(22)代入式(20),可总体评价元件的参与程度。

[0132] 将式(22)代入式(12),通过计算式(12)的参数灵敏度因子,这使得参数扰动传播到阻抗扰动。从而指导元件内部参数调整方向的选择,实现了异构电源电力系统的小扰动稳定性增强。具体调整方式为:根据修正后的参数灵敏度因子,以增强异构电源电力系统的扰动稳定性为目标,确定参数调整方向。

[0133] 本发明提供一种基于阻抗模型的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法,包括建立包含系统所有电源和网络元件的阻抗模型、根据电源和网络元件的阻抗模型生成全系统节点阻抗矩阵、根据全系统节点阻抗矩阵生成元件的导纳灵敏度矩阵、得到修正导纳灵敏度因子对系统元件进行参与分析。

[0134] 本发明的方法解决了在实际异构电源电力系统中阻抗模型参与分析方法因计算误差导致不稳定元件判定错误的问题。考虑了变压器变比对阻抗模型模态分析方法的误差影响,并通过多个模态结果具体分析了评价元件参与程度的误判现象并给出了修正结果。可快速方便地定位异构电源电力系统中对系统不稳定参与程度最高的元件。

[0135] 至此,一种基于阻抗模型的基于阻抗模型的异构电源电力系统修正参与分析方法设计完成。

[0136] 以下结合具体实例,详细介绍本发明的方法:

[0137] 表1给出了在不考虑修正和考虑修正的计算结果和误差。这里指出后面关于模态的计算值均是考虑除以 $2\pi$ 后的频率值,模态 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别是 $-4.0935+30.0633i$ 和 $-2.8589+7.3169i$ 。

[0138] 表1变压器变比修正对模态分析的误差结果

$\lambda, \rho$	$\lambda_1, L_{56}$	$\lambda_2, L_{56}$
未修正 $\Delta \lambda_{pr}$	$-0.0741+0.2415i$	$0.0084-0.1039i$
修正 $\Delta \lambda_{pr}$	$-0.0612+0.2129i$	$0.0084-0.0901i$
实际 $\Delta \lambda$	$-0.0621+0.2059i$	$0.0084-0.0871i$
未修正Error	14.854%	16.146%
修正Error	3.165%	3.251%

[0140] 从表1的结果可以看到对于模态 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ,考虑变压器变比修正后,按阻抗模型模态分析方法计算得到的误差仅在3%左右,而未考虑变压器变比修正的误差结果在15%左右。误差结果几乎是5倍左右。

[0141] 这里指出线路支路只是变比为1的特殊情况。表1中的计算结果是在变比原始值为0.932时计算得到的,变比偏离1越远,计算得到的误差就会越大。如果考虑变压器的星角接法,这里的变比就是一个有30度角度偏移的复数。如果按照不考虑变压器变比,计算结果的误差将进一步拉大。因此实际使用阻抗模型模态分析方法时,考虑变压器变比的修正是十分必要的。

[0142] 先前的研究对于串联线路参数的模态分析仅限于一个3节点无源系统。链式法则的第一层是利用柯西不等式放缩得到的,被认为是一个可以总体描述不同元件参与程度的指标。这在实际系统分析时是有很大的误差的,因为柯西不等式得到的只是一个可能的值,需要对其进行修正。

[0143] 图4所示的系统低频部分的模态分布如图5所示。考虑如图5被红色标记的4个模态,对这四个模态计算三层链式法则的第一层和第二层。模态1、模态2、模态3和模态4的计算结果如图6、图7、图8和图9所示。图6、图7、图8和图9中的(a)部分、(b)部分、(c)部分分别是三层链式法则的第一层、三层链式法则的第二层实部(代表阻尼)和三层链式法则的第二层虚部(代表自然频率)。

[0144] 以图6的模态1为例,图6的(a)部分代表三层链式法则第一层,用以衡量所有元件的参与程度,其颜色越深代表该元件在模态1下参与程度越大。其对角元代表母线所连电源,非对角元素中代表串联在两个母线之间支路的参与程度。图中白色部分代表并不存在实际线路或电源。图6的(a)部分显示模态1下母线6连接的构网型变流器A6参与程度最高,其次是支路5-6的参与程度也较大。参与程度越大该元件发生扰动对模态1的影响越大。

[0145] 图6的(b)部分表示模态1下各元件导纳增加时,该模态的实部变化情况。绿色代表往远离虚轴的方向移动,这使该模态阻尼增大。红色代表往靠近虚轴的方向移动,这使该模态阻尼更小。由图6可知,如果考虑在母线6增大构网型变流器的并联数量或者减小其基准功率,这会使得其导纳增大,从而增大该模态的阻尼。如果支路5-6通过并联相同规模的支

路增大其导纳,这会导致模态1的阻尼减小。值得注意的是,这里强调导纳变化的方向与原先导纳的方向一致,这才会带来图6中所示的阻尼变化效果。元件中某个参数发生变化时,并不一定会导致模态会按图中方向变化,这涉及模态分析的第三层。图6的(c)部分则代表各元件导纳增大时,该模态频率的变化情况。

[0146] 从图6和图7中可以看出,当支路5-6或构网型变流器A6的导纳变化,这会带给模态1和模态2完全相反的变化情况。这意味着调整系统各元件的参数并不会使得所有模态的阻尼都增加,即阻尼的双面性。如果调整系统参数,需要考虑有利于模态2阻尼增大的方向进行调整。因为模态2本身阻尼更小,离虚轴更近,更容易激发振荡。

[0147] 图6至图9各自的(a)部分显示四个模态幅值变化的最大可能值大约分别是120、600、5和120。这里取图6至图9中表示阻尼的(b)部分和表示频率的(c)部分的最大值计算最大的幅值,大约分别是85、28、1.2和0.5。与之前方法计算的第一层结果从数值上差距是非常大,之前方法计算的模态4变化幅值大约是实际变化量的240倍。

[0148] 图8和图9的(a)部分显示模态3和模态4中构网型变流器A6的参与程度最大。但是图8的(b)部分和(c)部分显示同步机A8和支路7-8的参与程度都大于构网型变流器A6。同样的,图9的(b)部分和(c)部分显示同步机A2、同步机A3和同步机A8的参与程度同样很高。

[0149] 图10给出了模态2、模态3和模态4修正后计算得到的第一层。对比图7-图9,可以看出修正后计算的结果更能真实地反映各个元件对系统模态的总体参与程度。

[0150] 本发明方案的有益效果是:本发明基于阻抗模型提出了异构电源电力系统的修正参与分析方法。该方法有效解决了阻抗模型参与分析方法在大规模异构电源电力系统应用时的较大计算误差,并导致不稳定元件判定错误的问题。给出了考虑变压器变比的误差修正和总体评价元件参与程度的误判原因,对阻抗模型参与分析方法做了进一步的修正。并通过数值计算结果对理论分析进行了验证。所研究结果对目前含高比例变流器的异构电源电力系统的参与分析具有一定的借鉴意义。

[0151] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。

[0152] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

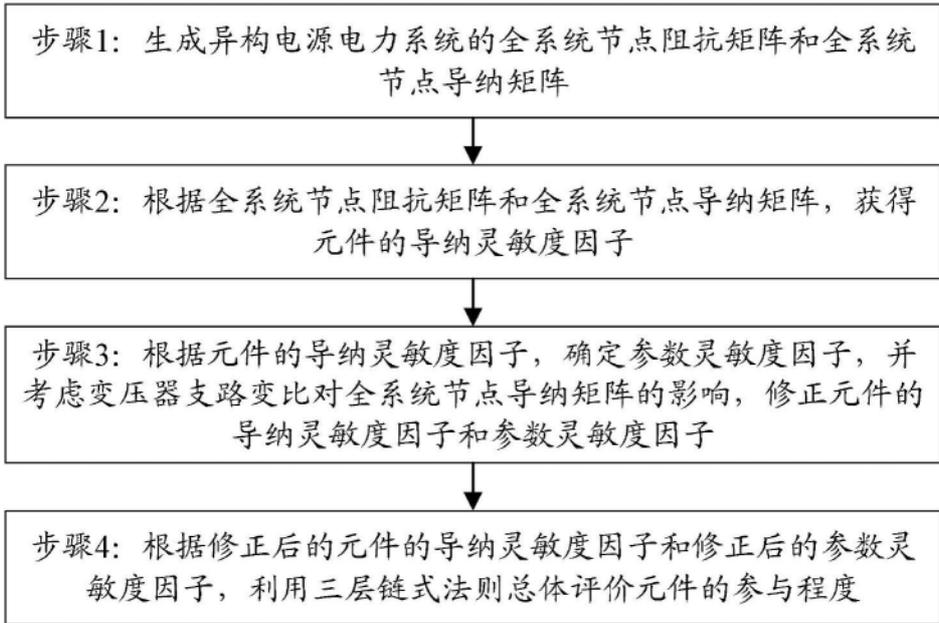


图1

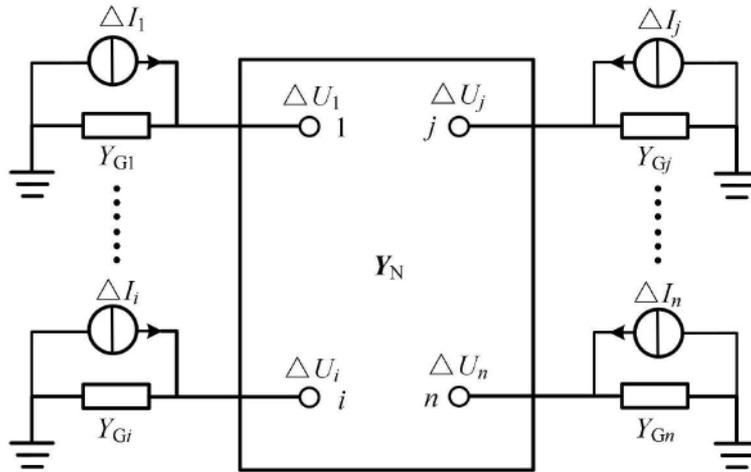


图2

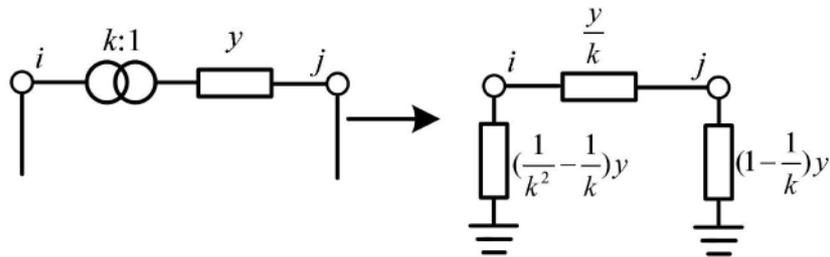


图3

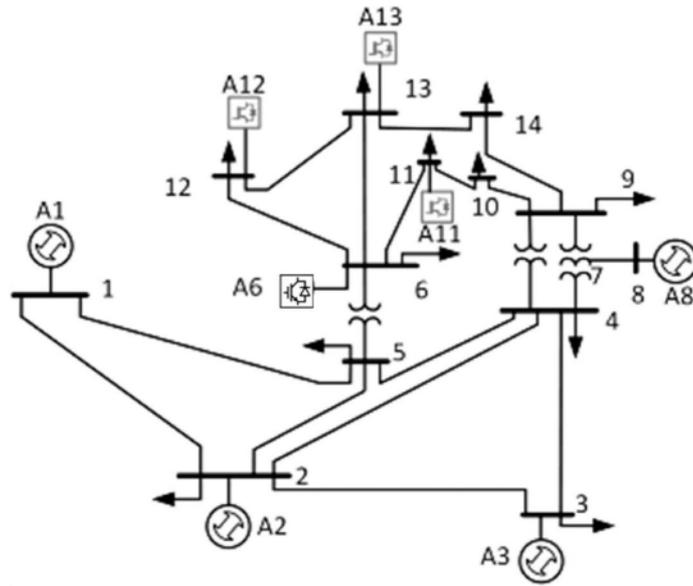


图4

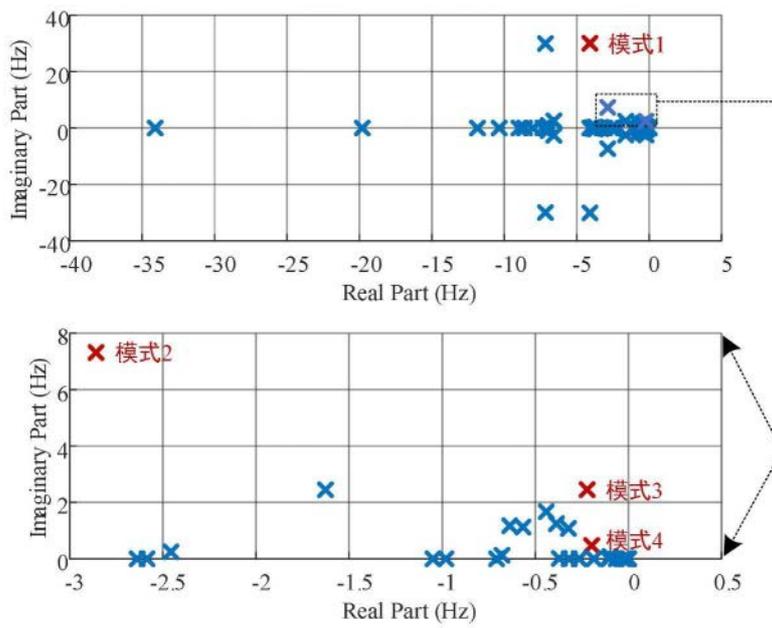


图5

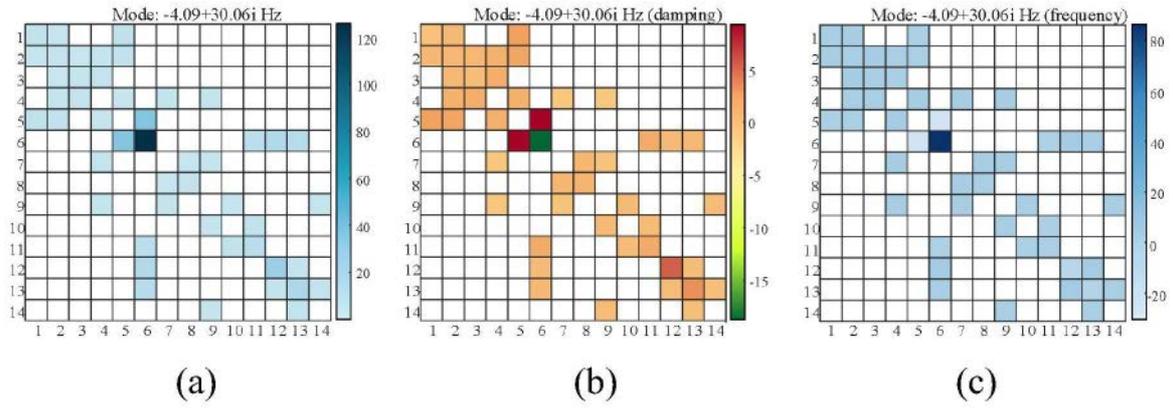


图6

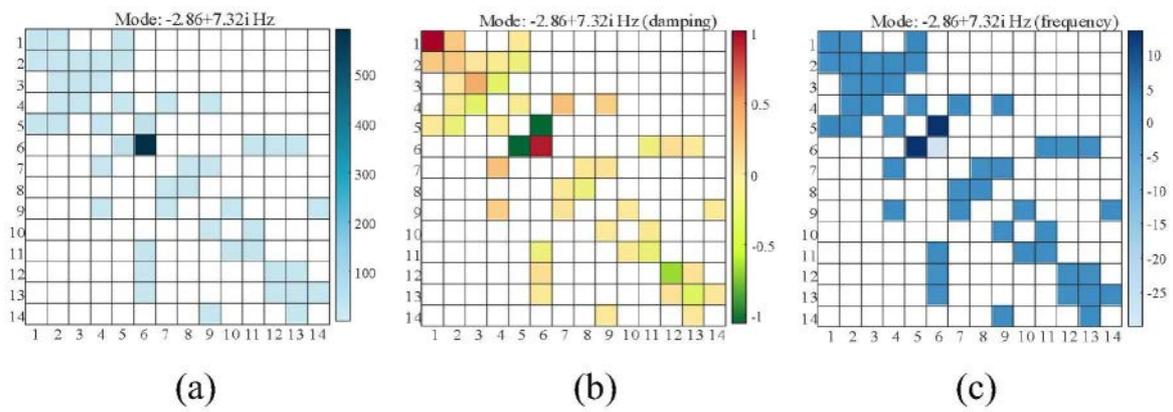


图7

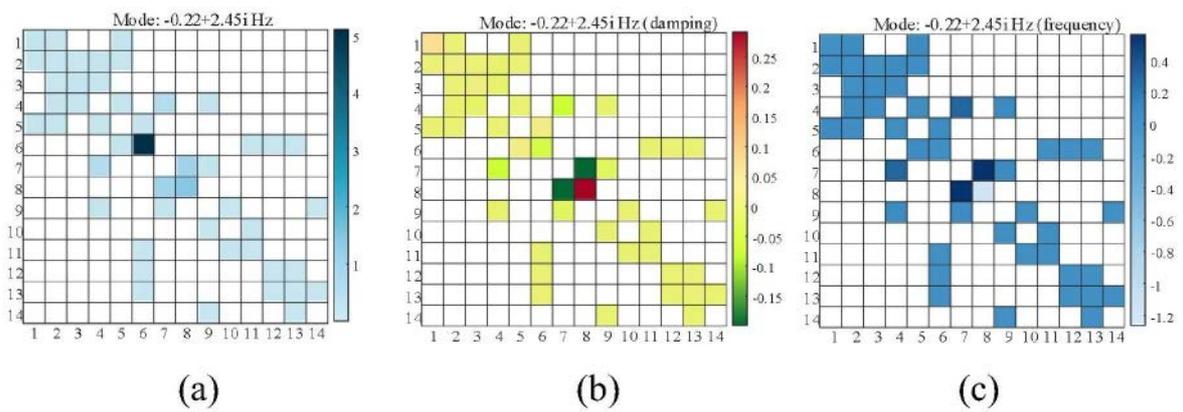


图8

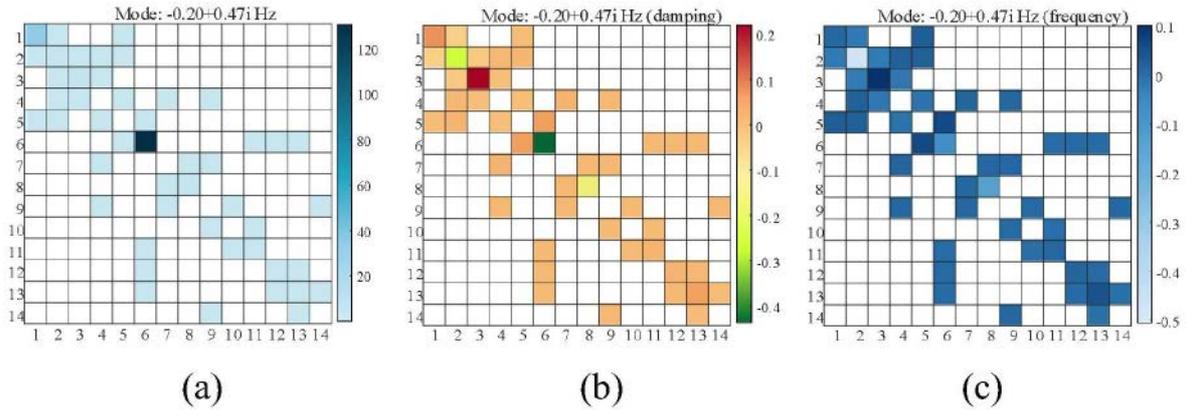


图9

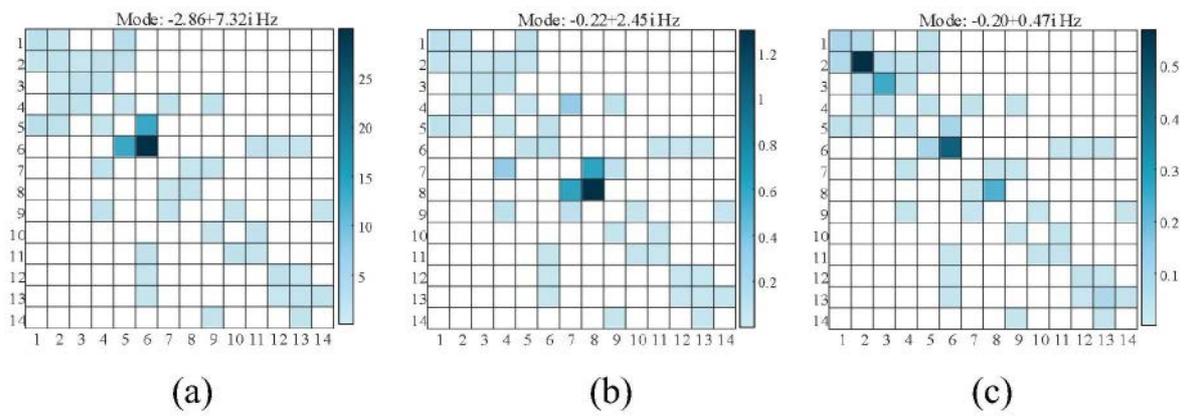


图10