



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105529711 A

(43) 申请公布日 2016. 04. 27

(21) 申请号 201610059494. X

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2016. 01. 28

H02J 3/01(2006. 01)

G06F 17/50(2006. 01)

(71) 申请人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

申请人 国网北京经济技术研究院

武汉大学

(72) 发明人 吴方劼 马为民 石岩 陈东

乐波 杨一鸣 胡志坚 王小飞

薛英林 付颖 祝全乐 杨媛

王赞 杜晓磊

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

代理人 关畅 刘美丽

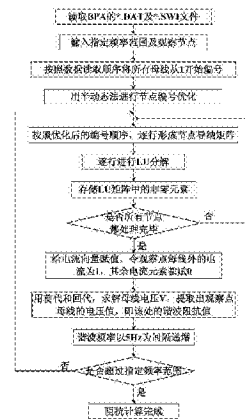
权利要求书1页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于 BPA 数据的交流系统谐波阻抗扫描方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于 BPA 数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在在于,包括以下内容: 1) 建立电力系统中各元件谐波阻抗模型; 2) 读取 BPA 数据,输入指定频率范围及观察节点; 3) 基于改进连线矩阵,采用半动态法进行节点编号优化; 4) 按照优化后的编号顺序,逐行形成节点导纳矩阵; 5) 求解节点电压方程; 6) 根据频率扫描范围,在指定频率范围内改变频率,重新形成节点导纳矩阵,返回步骤 5) 求解节点电压方程,即可得到在不同频率下的谐波阻抗。本发明与现有技术相比,计算速度有显著提高,不受节点数量和节点电压等级的限制,广泛应用在电力系统谐波阻抗计算中。



1. 一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,包括以下内容:

- 1) 建立电力系统中各元件谐波阻抗模型;
- 2) 读取BPA数据,输入指定频率范围及观察节点;
- 3) 基于改进连线矩阵,采用半动态法进行节点编号优化;
- 4) 按照优化后的编号顺序,逐行形成节点导纳矩阵;
- 5) 求解节点电压方程;

6) 根据频率扫描范围,在指定频率范围内改变频率,重新形成节点导纳矩阵,返回步骤5)求解节点电压方程,即可得到在不同频率下的谐波阻抗。

2. 如权利要求1所述的一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,改进的连线矩阵M共有三列,第一列表示两个节点所连支路的类型,后两列表示两个节点编号,形成M的具体思路是:按照*.DAT文件中B卡出现顺序将所有母线从1开始进行编号,按照L卡、E卡和T卡的首末节点在文件中出现顺序,根据支路类型形成M的第一列,首末节点编号形成矩阵M的后两列。

3. 如权利要求1所述的一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,节点导纳矩阵按照优化编号后的节点顺序逐行形成,根据优化编号后的节点顺序依次选择节点,首先扫描矩阵M,得到与该节点相连的节点,再根据矩阵M第一列定位到其连接着的元件参数,读取并计算导纳值,对相应的导纳矩阵中的非对角元素赋值,同时累加到该节点对应的对角元素上;扫描完成后得到了该节点的互导纳和部分自导纳,再扫描该节点连接的接地元件,得到剩余部分自导纳值,结合两次扫描结果即可得到该节点完整的自导、互导。

4. 如权利要求1或2或3所述的一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,求解节点电压方程的具体过程为:

- 1) 将求得的导纳矩阵Y逐行进行LU分解;

2) 选择观察节点,观察节点处注入电流设置为1,其余节点注入电流设置为0,采用前代回代,求解母线电压V,提取出观察节点母线的电压值,即该处的谐波阻抗值。

5. 如权利要求4所述的一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,LU分解后的矩阵采用三角检索格式进行存储。

一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法

技术领域

[0001] 本发明是关于一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,属于电力系统谐波阻抗计算技术领域。

背景技术

[0002] 特高压直流输电工程换流站接入系统的边界条件复杂,运行方式多样,合理确定用于交流滤波器设计的谐波阻抗等值参数,能够实现交流滤波器方案的合理配置,同时也是研究高压直流(HVDC)系统谐波不稳定的关键。现代电力系统节点数成千上万,节点方程规模庞大,因而研究一种既能高效处理大型矩阵,并能兼顾考虑电力网络中运行方式变化所引起的网络拓扑结构变化的谐波阻抗计算方法显得尤为重要。

[0003] 加拿大太西蒙公司开发的NIMSCAN程序是目前世界上使用最广泛的谐波阻抗等值程序,该程序通过扫描BPA(Bonneville Power Administration)数据对系统阻抗进行计算,但是扫描过程过于繁琐,且没有核心源代码,特别随着电网电压等级的增加、新元件的出现,现有计算平台无法有效应对后续模型升级,已越来越不适应现代系统的计算。

发明内容

[0004] 针对上述问题,本发明的目的是提供一种能够为直流输电工程滤波器的参数设计提供依据的基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法。

[0005] 为实现上述目的,本发明采取以下技术方案:一种基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,其特征在于,包括以下内容:1)建立电力系统中各元件谐波阻抗模型;2)读取BPA数据,输入指定频率范围及观察节点;3)基于改进连线矩阵,采用半动态法进行节点编号优化;4)按照优化后的编号顺序,逐行形成节点导纳矩阵;5)求解节点电压方程;6)根据频率扫描范围,在指定频率范围内改变频率,重新形成节点导纳矩阵,返回步骤5)求解节点电压方程,即可得到在不同频率下的谐波阻抗。

[0006] 进一步,改进的连线矩阵M共有三列,第一列表示两个节点所连支路的类型,后两列表示两个节点编号,形成M的具体思路是:按照*.DAT文件中B卡出现顺序将所有母线从1开始进行编号,按照L卡、E卡和T卡的首末节点在文件中出现顺序,根据支路类型形成M的第一列,首末节点编号形成矩阵M的后两列。

[0007] 进一步,节点导纳矩阵按照优化编号后的节点顺序逐行形成,根据优化编号后的节点顺序依次选择节点,首先扫描矩阵M,得到与该节点相连的节点,再根据矩阵M第一列定位到其连接着的元件参数,读取并计算导纳值,对相应的导纳矩阵中的非对角元素赋值,同时累加到该节点对应的对角元素上;扫描完成后得到了该节点的互导纳和部分自导纳,再扫描该节点连接的接地元件,得到剩余部分自导纳值,结合两次扫描结果即可得到该节点完整的自导、互导。

[0008] 进一步,求解节点电压方程的具体过程为:1)将求得的导纳矩阵Y逐行进行LU分解;2)选择观察节点,观察节点处注入电流设置为1,其余节点注入电流设置为0,采用前代

回代,求解母线电压 V ,提取出观察节点母线的电压值,即该处的谐波阻抗值。

[0009] 进一步,LU分解后的矩阵采用三角检索格式进行存储。

[0010] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:1、由于本发明正是根据我国直流输电工程自主化设计的要求,基于BPA数据采用电力系统各元件典型谐波模型,由改进的节点法得到导纳矩阵 Y ,根据节点电压方程 $YV=I$,由单位电流注入法,计算得到 V ,即所需节点的等值谐波阻抗,因此,本发明充分利用节点导纳矩阵的稀疏特性,减少不必要的计算以提高求解效率。2、本发明对连线矩阵进行改进,将其运用于半动态法的节点优化过程中,基于改进的连线矩阵对传统节点法进行改进,提出了改进的节点法,并用于导纳矩阵的形成过程,减少数据的扫描量,提高了数据检索效率。3、本发明选取了适合于谐波阻抗计算的发电机、变压器、输电线路、负荷、无功补偿装置等电气元件的数学模型,能够有效应对后续模型的升级,所需参数可以从BPA数据直接读取。4、本发明采用半动态节点编号优化方法,且采用LU分解算法及前代回代方法求解大型节点电压方程,同时运用节点优化编号、排零存储与排零计算技术提高计算速度;本发明与现有技术相比,计算速度有显著提高,不受节点数量和节点电压等级的限制,广泛应用在电力系统谐波阻抗计算中。

附图说明

[0011] 图1为本发明基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描流程图;

[0012] 图2为本发明采用的发电机等值电路示意图;

[0013] 图3为本发明采用的变压器等值电路示意图;

[0014] 图4为本发明采用的输电线路等值电路示意图;

[0015] 图5为本发明采用的负荷模型示意图;

[0016] 图6为本发明形成一行节点导纳矩阵的流程示意图;

[0017] 图7为本发明实施例中的IEEE 9节点系统拓扑结构图。

具体实施方式

[0018] 以下结合附图来对本发明进行详细的描绘。然而应当理解,附图的提供仅为了更好地理解本发明,它们不应该理解成对本发明的限制。

[0019] 如图1所示,本发明的基于BPA数据的交流系统谐波阻抗扫描方法,包括以下内容:

[0020] 1、建立电力系统中各元件谐波阻抗模型

[0021] 进行谐波分析时,准确的元件模型是保证获得精确可靠结果的关键因素。在研究BPA中元件模型的基础上,参考各种典型元件谐波阻抗模型,本发明建立的各元件模型如下:

[0022] 1)建立发电机谐波阻抗模型

[0023] 如图2所示,实际工程中,发电机采用同步电机,故在阻抗扫描时,采用同步发电机模型,读取BPA数据中发电机的定子电阻及次暂态电抗, h 次谐波时的阻抗表达式为:

$$[0024] \quad Z_G(h) = R_a + jhX''_d$$

[0025] 式中, R_a 为发电机电枢电阻; X''_d 为发电机直轴次暂态电抗。

[0026] 由于实际系统数据规模庞大,容易出现人为输入误差,当读取的发电机数据不含电阻参数时,根据经验公式定子电阻赋值:

$$[0027] \quad R_a = \begin{cases} X_d''/20 & T_d'' = 0 \text{ or } T_d'' > 1 \\ X_d'' \times 0.003185/T_d'' & 0 < T_d'' < 1 \end{cases}$$

[0028] 式中, T_d'' 为直轴次暂态时间常数。

[0029] 2) 建立发电机谐波阻抗模型

[0030] 如图3所示, 变压器采用“pi”型等值电路, h 次谐波时变压器的阻抗为:

$$[0031] \quad Z_T(h) = R_T + jhX_T$$

[0032] 式中, R_T 为变压器短路电阻; X_T 为变压器短路电抗。

[0033] 在变压器处理中, 若读取的短路电阻参数为0, 根据经验公式电阻赋值:

$$[0034] \quad R_T = X_T/25。$$

[0035] 3) 建立输电线路的阻抗模型

[0036] 如图4所示, 谐波阻抗扫描涉及高频下的阻抗特性, 因此输电线路考虑集肤效应和长线效应的影响, 采用“pi”型等值电路进行模拟。

[0037] ①集肤效应的计算表达式如下:

$$[0038] \quad \frac{R}{R_0} = \frac{mr \operatorname{ber}(mr) \cdot \operatorname{bei}'(mr) - \operatorname{bei}(mr) \cdot \operatorname{ber}'(mr)}{2 [\operatorname{bei}'(mr)]^2 + [\operatorname{ber}'(mr)]^2}$$

[0039] 式中, ber , bei 为复Bessel函数的实部和虚部; ber' , bei' 为其相应的导数; mr 的计算公式如下:

$$[0040] \quad mr = r \sqrt{\frac{\omega \mu}{\rho}} = r \sqrt{\frac{2\pi f \times 4\pi \times 10^{-7} \mu_r}{\rho}} = \sqrt{\frac{2f \times 4\pi \times 10^{-7} \mu_r}{\rho/\pi r^2}} = 0.001585 \sqrt{\frac{\mu_r f}{R_0}}$$

[0041] 式中, μ_r 为导线的相对磁导率, 一般近似地取1; f 为频率; R_0 为直流电阻。

[0042] ②考虑长线影响

[0043] 考虑长线路的分布特性, 采用双曲函数修正, h 次谐波时的计算公式如下:

$$[0044] \quad Z_{eq}(h) = \sqrt{\frac{R + jhX}{jhB}} \sinh \sqrt{(R + jhX)jhB}$$

$$[0045] \quad Y_{eq}(h) = \sqrt{\frac{jhB}{R + jhX}} \frac{2(\cosh \sqrt{(R + jhX)jhB} - 1)}{\sinh \sqrt{(R + jhX)jhB}}$$

[0046] 式中, R 为考虑集肤效应后的线路电阻; X 为线路电抗; B 为线路电纳; Z_{eq} 为双曲函数修正后的线路阻抗; Y_{eq} 为双曲函数修正后的线路电纳。

[0047] 4) 建立负荷的阻抗模型

[0048] 如图5所示, 电网中绝大部分负荷都是集中型, 并联负荷模型适合于表示集中负荷, 因此基于BPA数据的负荷采用并联模型, 将其转化为对应电压下的阻抗值。计算中, 阻抗不随频率的变化而变化, 导纳 Y_p 的计算公式如下:

$$[0049] \quad Y_p = \frac{P}{V^2} - j \frac{Q}{V^2} = \frac{1}{R_p} - j \frac{1}{X_p}$$

[0050] 式中, R_p , X_p 分别为负荷的等效电阻、等效电抗; P , Q 分别为该处母线吸收的有功、无功功率; V 为该处电压值。

[0051] 5)建立无功补偿装置的阻抗模型

[0052] 阻抗计算中,无功补偿装置不作负载,而是分离出来作为单独的支路处理。

[0053] $Q_c > 0$ 时,补偿装置为容性,此时:

$$[0054] \quad X_c = \frac{V^2}{hQ_c}$$

[0055] $Q_c < 0$ 时,补偿装置为感性,此时:

$$[0056] \quad X_c = -\frac{hV^2}{Q_c}$$

[0057] 式中, X_c 为等效电抗; Q_c 为补偿容量,单位MVar; V 为节点处电压值,单位kV。

[0058] 2、读取BPA数据,输入指定频率范围及观察节点。

[0059] 选择需要扫描BPA的数据,即*.DAT文件和*.SWI文件,可以同时选择多组数据进行顺序计算;根据元件的谐波阻抗模型读取相应的参数,并用数组进行存储;设定观察节点名称,节点电压,阻抗扫描频率范围,断线方式。

[0060] 3、基于改进连线矩阵,采用半动态法进行节点编号优化。

[0061] 为有效存储系统的拓扑结构,提高检索效率,对连线矩阵进行改进,改进连线矩阵定义为M,其结构如下:

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 5 \\ \dots & \dots & \dots \\ m & i & n \end{bmatrix}$$

[0063] 改进的连线矩阵表示节点之间的连接关系,一共有三列,第一列表示两个节点所连支路的类型,后两列表示两个节点编号。如上述公式所示,第一行表示支路类型为1,支路两侧的节点编号为1和2,最后一行表示支路类型为m,支路两侧的节点编号为i和n。改进连线矩阵的第1列,L卡的类型是1,E卡的类型是2,T卡的类型是3,后两列根据实际网络拓扑结构形成,为表述方便,在以下的叙述中,统一将改进的连线矩阵M简称为矩阵M。

[0064] 矩阵M表示节点之间的连接关系,在实际系统中,连接两个节点的元件有输电线路和变压器,故M的形成与这两种元件有关。形成M的具体思路是:按照*.DAT文件中B卡出现顺序将所有母线从1开始进行编号,按照L卡、E卡和T卡的首末节点在文件中出现顺序,根据支路类型形成M的第一列,首末节点编号形成矩阵M的后两列。矩阵M包含了系统的拓扑结构,根据矩阵M采用半动态法进行节点优化编号。

[0065] 4、按照优化后的编号顺序,逐行形成节点导纳矩阵。

[0066] 节点导纳矩阵的展开式如下式所示:

$$[0067] \quad Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

[0068] 式中,导纳矩阵对角元素 Y_{ii} 为各个节点的自导纳,即与该节点连接的所有支路导纳之和;导纳矩阵非对角元素 Y_{ij} 为节点 i 与 j 之间支路互导值取负。

[0069] 传统用计算机语言编程得到系统节点导纳矩阵的方法是“节点法”,即以母线为中心,扫描系统中所有元件,看其是否与该母线相连,如果是,再看其是否接地。接地支路的导纳只影响矩阵的自导纳,累加到自导元素即可,非接地支路对自导和互导均有影响,除了要累加到自导元素上外,同时还要将其加负号后赋值给对应的互导元素。不与该母线相连的元件不影响该母线的参数。系统所有母线扫描完成后,就得到了整个网络的导纳矩阵。

[0070] 如图6所示,矩阵 M 包含了系统的拓扑结构及支路信息,将其运用于节点导纳矩阵的形成过程,对传统节点法进行改进,得到改进的节点法。节点导纳矩阵按照优化编号后的节点顺序逐行形成。根据优化编号后的节点顺序依次选择节点,首先扫描矩阵 M ,得到与该节点相连的节点,再根据矩阵 M 第一列定位到其连接着的元件参数,读取并计算导纳值,对相应的导纳矩阵中的非对角元素赋值,同时累加到该节点对应的对角元素上。扫描完成后,即可得到非接地支路部分对矩阵的影响,从而得到了该节点的互导纳和部分自导纳,再扫描该节点连接的发电机、负荷等接地元件,得到剩余部分自导纳值,结合两次扫描结果即可得到该节点完整的自导、互导。

[0071] 假设*.DAT文件中L卡、E卡和T卡三种类型支路的数量分别为 n_L 、 n_E 和 n_T ,则矩阵 M 第1至 n_L 行表示连接两节点的是L,第 n_L+1 到 n_L+n_T 行表示的是E,第 n_L+n_E+1 到 $n_L+n_E+n_T$ 行表示的是T。因此根据矩阵 M 第一列即可确定连接各个节点支路的类型,不需要再进行元件类型及是否接地的判断。同时在对原始BPA潮流数据进行读取和存储时,用三个二维数组 $vecL$ 、 $vecE$ 和 $vecT$ 分别存储对称线路L、不对称线路E和变压器T的参数,每一种卡片的存储顺序是其在BPA数据中出现的顺序。故矩阵 M 的行数与三个数组容量之和相同,并一一对应。矩阵 M 第1至 n_L 行对应着 $vecL$ 的检索号,行数大于 n_L 小于 n_L+n_T 时,编号减去 n_L 对应 $vecE$ 的检索号,行数大于 n_L+n_T 时,减去 n_L+n_T 则对应 $vecT$ 的检索号。因而互导的计算过程中,只需扫描矩阵 M 即可获得节点之间的连接关系,不需重新扫描原始数据,并且根据矩阵 M 第一列的编号可以定位到参与计算的连接元件的参数,从而很大程度上地减少扫描和计算过程,缩短计算时间。

[0072] 5、求解节点电压方程。

[0073] 求解节点电压方程 $YV=I$,当矩阵阶数很大时,直接求解不易实现。一般情况下,对其中大型矩阵进行分解,分解为较容易求解的形式。在电力系统的计算过程中,通常是先对节点导纳矩阵 Y 作LU分解,然后通过前代回代求解电压 V 。

[0074] 1)将求得的导纳矩阵 Y 逐行进行LU分解,当求得 Y 最后一行数据并进行分解后,就得到了完整的矩阵 L 和矩阵 U ,具体为:

[0075] 对于一个 n 阶方阵 Y ,将 $Y=LU$ 展开为:

$$[0076] \quad \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ l_{21} & 1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ l_{n1} & l_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & u_{nn} \end{bmatrix}$$

[0077] 根据Doolittle分解公式可得矩阵U的第1行元素:

$$[0078] \quad u_{1j} = y_{1j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$$

[0079] 矩阵L第1列元素:

$$[0080] \quad l_{i1} = \frac{y_{i1}}{u_{11}} \quad i = 2, 3, 4, \dots, n$$

[0081] 假设已经求出矩阵U的第1至*i*-1行元素,矩阵L的第1至*i*-1列元素,则可计算U的第*i*行元素:

$$[0082] \quad u_{ij} = Y_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} u_{kj}, \quad j = i, i+1, \dots, n$$

[0083] L的第*i*列元素:

$$[0084] \quad l_{ji} = \frac{(Y_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{jk} u_{ki})}{u_{ii}}, \quad j = i, i+1, \dots, n$$

[0085] 由于Y具有对称性,得到其上三角部分数据就能得到整个导纳矩阵数据。本发明中,Y逐行形成且只求取上三角部分数据,同时逐行进行分解。假设求取得到的系统节点导纳矩阵第*i*行元素为: $Y_i = [0 \ 0 \ \cdots \ y_i \ y_{i+1} \ \cdots \ y_n]$,分解得到的上三角矩阵U的第*i*行为: $U_i = [0 \ 0 \ \cdots \ u_i \ u_{i+1} \ \cdots \ u_n]$,下三角矩阵L的第*i*列为: $L_i = [0 \ 0 \ \cdots \ 1 \ l_{i+1} \ \cdots \ l_n]^T$ 。

[0086] 此时的LU分解公式为:

$$[0087] \quad \begin{cases} u_j = y_j - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} \times u_{kj} \\ l_j = \frac{(y_j - \sum_{k=1}^{i-1} l_{jk} \times u_{ki})}{u_i} = \frac{u_j}{u_i} \end{cases} \quad (j = i, i+1, \dots, n)$$

[0088] 式中, u_j 、 y_j 分别对应矩阵U和矩阵Y第*i*行的第*j*个元素; l_j 对应矩阵L第*i*列的第*j*个元素。

[0089] 从Y的第一行开始逐行得到,由于对称性同时得到其第一列数据,再逐行进行LU分解。由上述公式可以看出,在分解过程中矩阵U(L)的第*i*行(列)只与其前*i*-1行(列)的数据及Y的第*i*行数据有关。

[0090] 2)选择观察节点,观察节点处注入电流设置为1,其余节点注入电流设置为0,采用前代回代,求解母线电压V,提取出观察点母线的电压值,即该处的谐波阻抗值,具体过程为:

[0091] 最终需要求解的矩阵方程展开式如下:

$$[0092] \quad \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

[0093] 将Y进行LU分解后,矩阵方程 $YV=I$ 转化为 $LUV=I$,令 $UV=X$,有 $LX=I$ 。可知,LU分解之后求解网络节点方程分为两步:前代,求解 $LX=I$,计算出X;回代,求解 $UV=X$,得到需要的V。

[0094] 先通过前代求解矩阵方程 $LX=I$,得到X,计算公式如下:

$$[0095] \quad \begin{cases} x_1 = i_1 \\ x_i = i_i - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} x_j \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, n$$

[0096] 再通过回代求解矩阵方程 $UV=X$,得到V,计算公式如下:

$$[0097] \quad \begin{cases} v_n = x_n / u_{nn} \\ v_i = x_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} v_j \end{cases} \quad i = n-1, n-2, \dots, 1$$

[0098] v_i 即为需要求得的结果。

[0099] 现代电力系统节点数动辄成千上万,系统规模越大,矩阵的稀疏性越大。而矩阵计算中,零元素参与计算是不必要进行的,其存储也是多余的。本发明中矩阵L和U采用排零存储与排零计算技术,只存储非零元素,只让非零元素参与计算,以减少计算量。排零存储指只存储矩阵中非零元素及相关检索信息,排零运算指按照非零元素的检索信息读取非零元素并参与相关运算。

[0100] 本发明采用三角检索格式存储稀疏矩阵LU分解后的矩阵。由于矩阵Y是对称阵,根据LU分解公式可以看出,矩阵U与矩阵L在结构上完全对称,即如果U第i行第j列元素是非零元,那么L第i列的第j行元素也是非零元,反之亦然。所以两个矩阵检索信息的存储格式完全相同,可共用同一组检索信息。由于L的对角元素都为1,不需要对其进行存储。根据以上分析,只需存储L矩阵的严格下三角部分非零部分的值进行存储即可。按行存储上三角矩阵U的非零元,按列存储下三角矩阵L的非零元,存储格式如下:

[0101] (1)一维数组YD存储矩阵对角元素的值;

[0102] (2)一维数组YU按行存储严格上三角部分非零元素值;

[0103] (3)一维数组JU依次存储YU中元素所在的列号;

[0104] (4)一维数组IU按行存储严格上三角部分每行第一个非零元在YU中的位置,即是YU的第几个元素。

[0105] (5)一维数组YL按列存储严格下三角部分非零元的值。

[0106] 普通存储方式需要4个数组存储矩阵U,3个数组存储矩阵L,共需要7个数组,本发明利用节点导纳矩阵的对称性,只需5个数组即可完成对矩阵L和U的存储,节约了存储空间。

[0107] 6、根据频率扫描范围,在指定频率范围内改变频率,重新形成节点导纳矩阵,返回

步骤5求解节点电压方程 $Y_h V_h = I_h$,即可得到在不同频率下的谐波阻抗。

[0108] 直流输电系统滤波器设计中,需要得到某一频段内,由换流站母线处等值的谐波阻抗范围。选定换流站的交流母线为阻抗扫描的观察节点后,指定频率变化的起始值、终止值及变化步长(例如谐波频率以5HZ为间隔进行递增)频率从起始值开始按照步长增长到终止值,分别计算所有出现频率下的阻抗值。计算完成后,即可获得阻抗值随频率变化的关系,进而获得换流站在感兴趣频率内阻抗值的范围。

[0109] 对单一频率阻抗计算方法拓展,能够计算所有频率的阻抗值。此时节点电压方程随频率变化而变化,考虑频率时的节点电压方程如下:

$$[0110] \quad Y_h V_h = I_h$$

[0111] 式中, Y_h 是h频次时的导纳矩阵; V_h 是h频次时的电压列向量; I_h 是h频次时的注入电流列向量。

[0112] 根据上述步骤5,该方程给定电流向量 I_h ,求解电压向量 V_h 。电流向量的赋值方式是令观察点处对应的元素为1,其余元素为0,即在观察节点注入单位电流,其余节点无注入电流。电流向量 I_h 的参数设置仅与选定的观察点相关,与频率无关。形成导纳矩阵 Y_h 需要扫描系统中的所有元件,电力系统中大部分元件阻抗值与频率相关,因此导纳矩阵随着频率的变化而变化。不同频率下,根据上述公式求解得到的电压列向量 V_h 不同,谐波阻抗扫描,即求解各频率时的矩阵方程式。

[0113] 下面通过具体实施例详细说明应用本发明BPA数据进行谐波阻抗扫描,并用IEEE9节点标准系统证明本发明方法的有效性。系统的母线数据、变压器数据和输电线路数据如表1至表3所示。

[0114] 表1 IEEE 9节点系统母线数据

[0115]

母线名	基准电压值 (kV)	恒定有功负荷 (MW)	恒定无功负荷 (MVar)	并联导纳无功负荷 (MVar)	发电机电阻标幺值 (-表示非发电机节点)	发电机电抗标幺值 (-表示非发电机节点)
GEN 1	16.5	0	0	0	0	0.04

[0116]

GEN 2	18.0	0	0	0	0	0.089
GEN 3	13.8	0	0	0	0	0.107
BUS 1	230	0	0	0	-	-
BUS 2	230	35	10	0	-	-
BUS 3	230	0	0	0	-	-
BUS A	230	125	70	20	-	-
BUS B	230	90	40	10	-	-
BUS C	230	100	55	20	-	-

[0117] 表2 IEEE 9节点系统双绕组变压器数据

[0118]

变压器	I侧节点	电压等级 (kV)	J侧节点	电压等级 (kV)	两侧变比 (kV)	正序电 阻标么 值	正序电 抗标么 值
1	GEN1	16.5	BUS1	230	16.5/242	0.000	0.0567
2	GEN 2	18.0	BUS2	230	18.0/242	0.000	0.0625
3	GEN 3	13.8	BUS3	230	13.8/242	0.000	0.0586

[0119] 表3 IEEE 9节点系统输电线路数据

[0120]

数据组	I侧节点	J侧节点	电压等级 (kV)	正序电阻 标么值	正序电抗 标么值	对地电纳标 么值
线路1	BUS1	BUSA	230	0.0100	0.0850	0.0440
线路2	BUS1	BUSB	230	0.0170	0.0920	0.0395
线路3	BUS2	BUSA	230	0.0320	0.1610	0.0765
线路4	BUS2	BUSC	230	0.0085	0.0720	0.03725
线路5	BUS3	BUSB	230	0.0390	0.1700	0.0895
线路6	BUS3	BUSC	230	0.0119	0.1008	0.05225

[0121] 为说明所提方法的有效性,选择观察节点BUC,节点电压230kV,频率范围50-2500Hz,扫描步长50Hz,断线方式N-0。扫描结果输出格式为:频率,电阻标么值,电抗标么值,电阻有名值,电抗有名值,阻抗幅值,阻抗相角。计算结果如表4所示。

[0122] 表4 IEEE 9节点系统计算结果

[0123]

频率/Hz	电阻 (标么值)	电抗 (标么值)	电阻(有名 值)/ Ω	电抗(有名 值)/ Ω	幅值/ Ω	相角/ $^{\circ}$
50	0.0239	0.098	12.6587	51.8571	53.3798	76.282
100	0.0701	0.1913	37.0752	101.2083	107.7854	69.8809

[0124]

150	0.1687	0.2729	89.2481	144.3402	169.7036	58.2708
200	0.3285	0.2816	173.7794	148.9793	228.8976	40.6062
250	0.436	0.1765	230.6199	93.3772	248.8068	22.0429
300	0.4578	0.1012	242.175	53.536	248.0219	12.4655
350	0.5192	0.0418	274.6423	22.0922	275.5294	4.599
400	0.5621	-0.1102	297.344	-58.2838	303.0024	-11.0902
450	0.4725	-0.2646	249.9568	-139.96	286.4737	-29.2461
500	0.3318	-0.3142	175.5432	-166.198	241.7376	-43.4335
550	0.223	-0.2914	117.9612	-154.16	194.1137	-52.5772
600	0.1546	-0.242	1.8015	127.996	151.9032	-57.4177
650	0.1165	-0.1811	61.6354	-95.8121	113.9249	-57.247
700	0.1107	-0.1061	58.5698	-56.146	81.1344	-43.7896
750	0.1779	-0.0318	94.1266	-16.8473	95.6224	-10.1477
800	0.2869	-0.0656	151.7531	-34.7211	155.6745	-12.8874
850	0.3568	-0.1916	188.7555	-101.361	214.2491	-28.2356
900	0.2158	-0.326	114.1584	-172.448	206.8099	-56.4959
950	0.1033	-0.2803	54.6311	-148.285	158.0287	-69.7752
1000	0.0599	-0.2256	31.6881	-119.319	123.4546	-75.127
1050	0.0386	-0.176	20.4407	-93.1084	95.3257	-77.6179
1100	0.0315	-0.114	16.6749	-60.2994	62.5626	-74.542
1150	0.1303	-0.0194	68.952	-10.25	69.7097	-8.4553
1200	0.1516	-0.1786	80.2193	-94.4679	123.9328	-49.6631
1250	0.1093	-0.1589	57.8268	-84.0813	102.0471	-55.4818
1300	0.0936	-0.1777	49.4925	-93.996	106.2297	-62.2315
1350	0.0596	-0.1531	31.5245	-80.994	86.9127	-68.733
1400	0.0586	-0.1218	30.9737	-64.4431	71.5002	-64.3294
1450	0.0809	-0.1011	42.7863	-53.4967	68.5023	-51.3474
1500	0.113	-0.1188	59.7564	-62.8411	86.7169	-46.4414
1550	0.0978	-0.1558	51.7592	-82.4438	97.3447	-57.8789
1600	0.0643	-0.1566	34.0084	-82.8596	89.5672	-67.6851
1650	0.043	-0.1381	22.7328	-73.057	76.5121	-72.7157
1700	0.0327	-0.1047	17.3024	-55.3853	58.025	-72.6512

[0125]

1750	0.1377	0.0011	72.8325	0.6041	72.835	0.4753
1800	0.0532	-0.1857	28.1214	-98.2373	102.183	-74.0257
1850	0.0266	-0.1435	14.0805	-75.9235	77.2182	-79.4935
1900	0.0205	-0.1161	10.8664	-61.4358	62.3891	-79.9696
1950	0.0439	-0.0973	23.2384	-51.454	56.4582	-65.6944
2000	0.0289	-0.1061	15.2941	-56.1182	58.165	-74.7552
2050	0.022	-0.0716	11.6506	-37.9008	39.6511	-72.9127
2100	0.1952	-0.0335	103.2419	-17.7066	104.7492	-9.7319
2150	0.0449	-0.1544	23.7639	-81.6981	85.0841	-73.7816
2200	0.0242	-0.1232	12.7933	-65.1492	66.3934	-78.8902
2250	0.0181	-0.1021	9.589	-54.0245	54.8689	-79.9352
2300	0.0193	-0.0718	10.2153	-37.9886	39.3381	-74.949
2350	0.1592	-0.0598	84.2167	-31.624	89.9585	-20.5816
2400	0.0391	-0.1436	20.6815	-75.978	78.7425	-74.7728
2450	0.0224	-0.1208	11.8706	-63.8931	64.9864	-79.4751
2500	0.0177	0.1088	9.3493	-57.5773	58.3314	-80.7769

[0126] 上述各实施例仅用于说明本发明,其中方法的各实施步骤等都是可以有所变化的,凡是在本发明技术方案的基础上进行的等同变换和改进,均不应排除在本发明的保护范围之外。

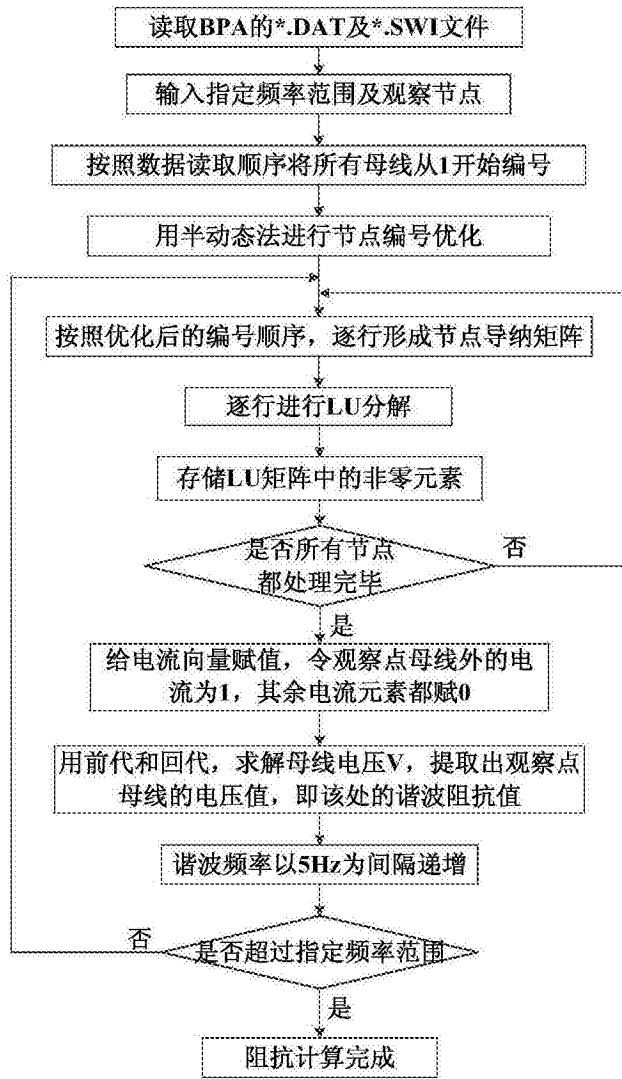


图1

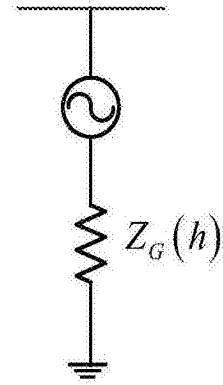


图2

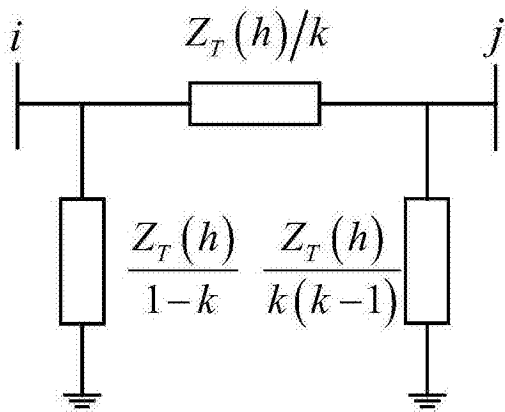


图3

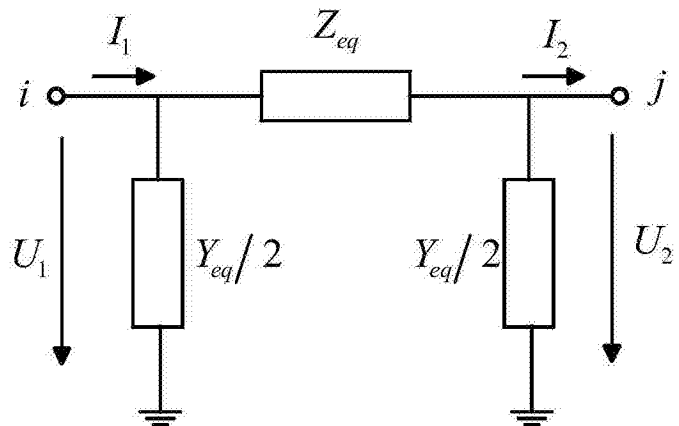


图4

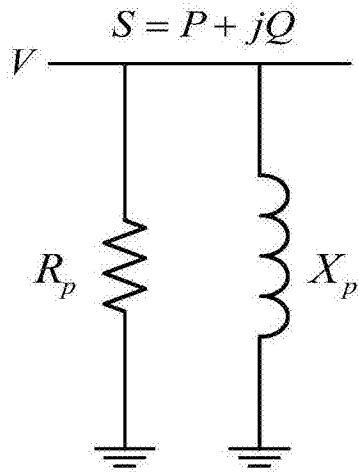


图5

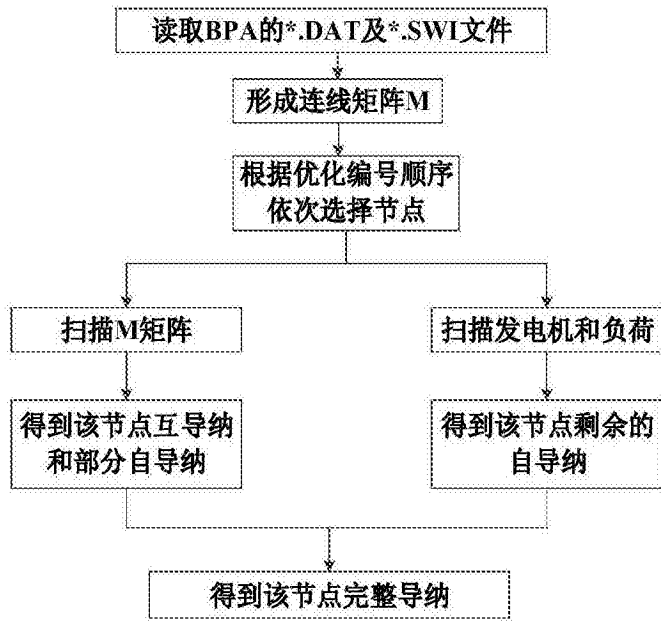


图6

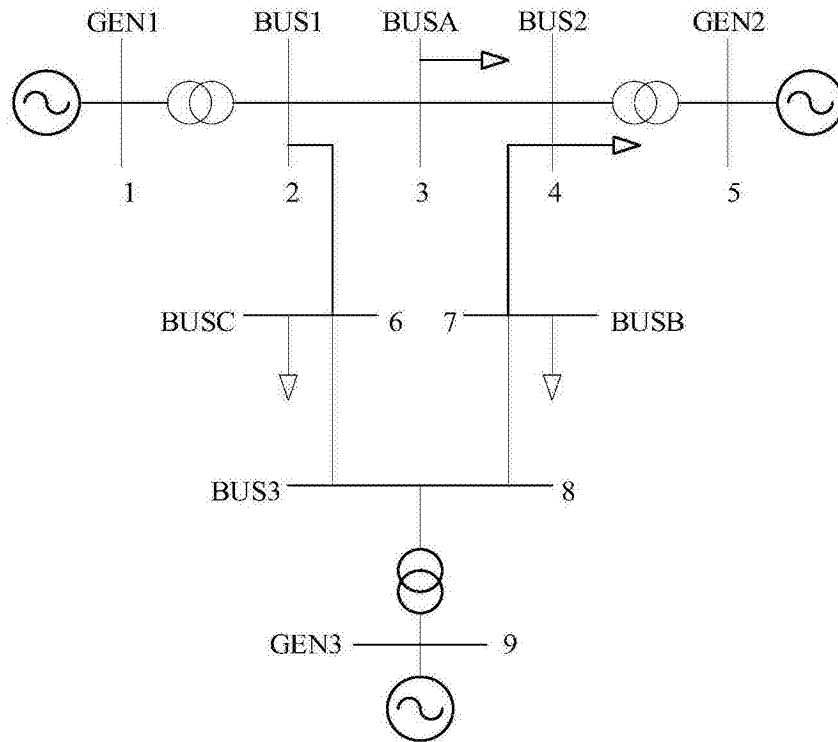


图7