



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110034573 B

(45) 授权公告日 2021.09.03

(21) 申请号 201811388306.3  
 (22) 申请日 2018.11.21  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 110034573 A  
 (43) 申请公布日 2019.07.19  
 (73) 专利权人 南方电网科学研究院有限责任公司  
 地址 510670 广东省广州市黄埔区科学城科翔路11号  
 专利权人 中国南方电网有限责任公司  
 (72) 发明人 陈雁 张东辉 李鹏飞 李霞林 黄迪  
 (74) 专利代理机构 广州三环专利商标代理有限公司 44202  
 代理人 麦小婵 郝传鑫

(51) Int.Cl.  
 H02J 3/36 (2006.01)  
 (56) 对比文件  
 CN 103324828 A, 2013.09.25  
 CN 103178534 A, 2013.06.26  
 CN 108429263 A, 2018.08.21  
 CN 103094929 A, 2013.05.08  
 US 2013257166 A1, 2013.10.03  
 马燕峰. 交直流混合电力系统低频振荡协调稳定控制.《中国优秀硕士学位论文全文数据库》.2005,正文第1-30页.  
 审查员 葛加伍

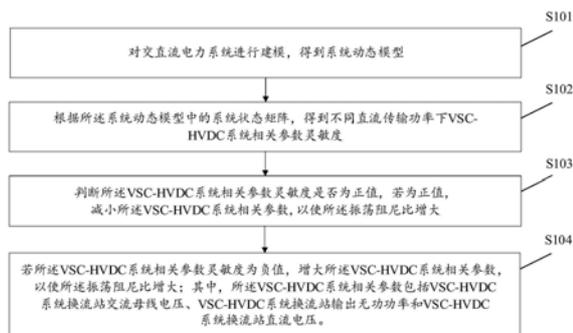
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法,包括以下步骤:对交直流电力系统进行建模,得到系统动态模型;根据系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;判断VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值,若是,减小VSC-HVDC系统相关参数,以使振荡阻尼比增大;若VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值,增大VSC-HVDC系统相关参数,以使振荡阻尼比增大;其中,VSC-HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压。本发明公开的含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法能够计及交直流混联系统中的交流系统的状态量对柔性直流输电系统的影响,从而使改善小干扰稳定性的准确度提高。



1. 一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法,其特征在于,包括如下步骤:

对交直流电力系统进行建模,得到系统动态模型;

根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;

判断所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值,若为正值,减小所述VSC-HVDC系统相关参数,以使振荡阻尼比增大;

若所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值,增大所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;其中,所述VSC-HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压;

其中,还包括:判断低频振荡模式下,所述振荡阻尼比最大的运行控制方式;将所述振荡阻尼比最大的运行控制方式作为所述交直流电力系统的运行控制方式;

所述系统动态模型如下式(1)所示:

$$\dot{X} = AX \quad (1)$$

式中, $X$ 为系统增量形式的状态变量, $A$ 为系统的状态矩阵;

根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,具体为:

对所述系统动态模型中系统状态矩阵进行特征值分析,得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

计算所述振荡频率为低频振荡频率时的左特征向量和右特征向量,并根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比;根据所述机电回路相关比判断系统工作模式是否为低频振荡模式;

若是,根据所述参与因子、机电回路相关比和振荡阻尼比,计算不同直流传输功率下所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度。

2. 如权利要求1所述的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法,其特征在于,对所述系统状态矩阵进行特征值分析,通过如下公式(2)、公式(3)和公式(4)得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

公式(2)如下所示:

$$|\lambda I - A| = 0 \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为矩阵 $A$ 的特征值,每一对特征值对应一种振荡模式, $I$ 为与 $A$ 同维数的单位矩阵;

令特征值 $\lambda_i = \delta_i + j\omega_i$ ,公式(3)如下所示:

$$\xi = -\frac{\delta_i}{\sqrt{\delta_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3)$$

式中, $\xi$ 为振荡阻尼比;

公式(4)如下所示:

$$f = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

式中,  $f$ 为振荡频率;

根据公式 (5) 和公式 (6) 计算所述振荡频率为低频振荡时的所述左特征向量和右特征向量, 并通过公式 (7) 和公式 (8) 根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比;

公式 (5) 如下所示:

$$v_i^T \Lambda = v_i^T \lambda_i \quad (5)$$

式中,  $v_i$ 为 $\lambda_i$ 的左特征向量,  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_i)$ ;

公式 (6) 如下所示:

$$A u_i = \lambda_i u_i \quad (6)$$

式中,  $u_i$ 为 $\lambda_i$ 的右特征向量;

定义第 $k$ 个状态变量 $x_k$ 同第 $i$ 个特征值 $\lambda_i$ 的相关性的物理量, 公式 (7) 如下所示:

$$p_{ki} = \frac{v_{ki} u_{ki}}{v_i^T u_i} \quad (7)$$

式中,  $p_{ki}$ 为参与因子,  $v_{ki}$ 、 $u_{ki}$ 分别为左右特征向量的 $k$ 行 $i$ 列元素,

公式 (8) 如下所示:

$$\rho_i = \left| \frac{\sum_{x_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}}{\sum_{x_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}} \right| \quad (8)$$

式中,  $\rho_i$ 为特征值 $\lambda_i$ 的机电回路相关比。

3. 如权利要求2所述的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法, 其特征在于, 根据如下公式 (9) 得到所述系统相关参数灵敏度;

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{v_i^T \frac{\partial A(\alpha)}{\partial \alpha}}{v_i^T u_i} \quad (9)$$

式中,  $\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha}$ 为系统相关参数灵敏度;  $\alpha$ 为系统相关参数, 还包括发电机出力、电力系统静态稳定器的放大倍数。

4. 如权利要求3所述的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法, 其特征在于, 当所述特征值 $\lambda_i$ 满足如下公式 (10) 时, 系统振荡模式为低频振荡模式:

$$\begin{cases} \rho_i > 1 \\ \lambda_i = \alpha + j\Omega \quad \Omega \in 0.2 - 2.5 \text{Hz} \end{cases} \quad (10)$$

5. 一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置, 其特征在于, 包括:

系统建模模块, 用于对交直流电力系统进行建模, 得到系统动态模型;

灵敏度计算模块, 用于根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵, 得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;

参数调节模块, 用于判断所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值, 若为正值, 减小所述VSC-HVDC系统相关参数, 以使振荡阻尼比增大; 若所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值, 增大所述VSC-HVDC系统相关参数, 以使所述振荡阻尼比增大; 其中, 所述VSC-

HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压；

所述系统动态模型如下式(1)所示：

$$\dot{X} = AX \quad (1)$$

式中， $X$ 为系统增量形式的状态变量， $A$ 为系统的状态矩阵；

根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵，得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度，具体为：

对所述系统动态模型中系统状态矩阵进行特征值分析，得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率；

计算所述振荡频率为低频振荡频率时的左特征向量和右特征向量，并根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比；根据所述机电回路相关比判断系统工作模式是否为低频振荡模式：

若是，根据所述参与因子、机电回路相关比和振荡阻尼比，计算不同直流传输功率下所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度。

6. 一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置，包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中且被配置为由所述处理器执行的计算机程序，所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求1至4中任意一项所述的含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。

7. 一种计算机可读存储介质，其特征在于，所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序，其中，在所述计算机程序运行时控制所述计算机可读存储介质所在设备执行如权利要求1至4中任意一项所述的含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。

## 含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及交直流电力系统优化技术领域,尤其涉及一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法及装置。

### 背景技术

[0002] 区域间电网互联规模不断扩大,在提高电网运行经济性的同时,也增加了局部弱电网与主网之间发生低频振荡的风险,威胁到电网的安全稳定运行。相比传统直流输电技术,柔性直流输电技术(Voltage-Sourced Converter HVDC)不存在换相失败造成的换流阀闭锁,使得VSC-HVDC很适合于向弱交流系统供电,成为代替传统交流联络线路,联接局部弱电网与主网的一种新选择,为提高系统运行稳定性、抑制低频振荡提供了新思路。VSC-HVDC的运行控制方式,根据控制量类型不同可分为:有功类控制与无功类控制。不同运行控制方式的组合对电力系统的小扰动稳定性影响也各不相同。因此,探究VSC-HVDC的最佳阻尼运行控制方式,对改善含柔性直流输电系统的交直流混合输电系统的小干扰稳定性具有重要意义。

[0003] 现有技术提供了4端口VSC-MTDC的数学模型,基于Simulink仿真软件分析了VSC控制器参数对系统稳定性的影响;分析了向无源网络供电的MMC型VSC-HVDC的系统结构和工作原理,给出了MMC型VSC-HVDC通用的换流系统和受端交流系统的数学模型,在PSCAD中搭建了向无源网络供电的MMC型VSC-HVDC仿真系统,并进行了仿真。因此,现有技术的系统稳定性优化方法仅考虑了柔性直流系统的状态量,无法全面地对影响系统运行的变量进行分析。

### 发明内容

[0004] 本发明实施例提供一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法,能够计及交直流混联系统中的交流系统的状态量对柔性直流输电系统的影响,从而使改善小干扰稳定性的准确度提高。

[0005] 本发明实施例一提供一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法,包括以下步骤:

[0006] 对交直流电力系统进行建模,得到系统动态模型;

[0007] 根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;

[0008] 判断所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值,若为正值,减小所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;

[0009] 若所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值,增大所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;其中,所述VSC-HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压。

[0010] 作为上述方案的改进,所述系统动态模型如下式(1)所示:

[0011]  $\dot{X} = AX$  (1)

[0012] 式中,  $X$  为系统增量形式的状态变量,  $A$  为系统的状态矩阵。

[0013] 作为上述方案的改进, 根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵, 得到不同直流传输功率下 VSC-HVDC 系统相关参数灵敏度, 具体为:

[0014] 对所述系统动态模型中系统状态矩阵进行特征值分析, 得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

[0015] 计算所述振荡频率为低频振荡频率时的左特征向量和右特征向量, 并根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比; 根据所述机电回路相关比判断系统工作模式是否为低频振荡模式:

[0016] 若是, 根据所述参与因子、机电回路相关比和振荡阻尼比, 计算不同直流传输功率下所述 VSC-HVDC 系统相关参数灵敏度。

[0017] 作为上述方案的改进, 对所述系统状态矩阵进行特征值分析, 通过如下公式 (2)、公式 (3) 和公式 (4) 得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

[0018] 公式 (2) 如下所示:

[0019]  $|\lambda I - A| = 0$  (2)

[0020] 式中,  $\lambda$  为矩阵  $A$  的特征值, 每一对特征值对应一种振荡模式,  $I$  为与  $A$  同维数的单位矩阵;

[0021] 令特征值  $\lambda_i = \delta_i + j\omega_i$ , 公式 (3) 如下所示:

[0022]  $\xi = -\frac{\delta_i}{\sqrt{\delta_i^2 + \omega_i^2}}$  (3)

[0023] 式中,  $\xi$  为振荡阻尼比;

[0024] 公式 (4) 如下所示:

[0025]  $f = \frac{\omega_i}{2\pi}$  (4)

[0026] 式中,  $f$  为振荡频率;

[0027] 根据公式 (5) 和公式 (6) 计算所述振荡频率为低频振荡时的所述左特征向量和右特征向量, 并通过公式 (7) 和公式 (8) 根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比;

[0028] 公式 (5) 如下所示:

[0029]  $v_i^T \Lambda = v_i^T \lambda_i$  (5)

[0030] 式中,  $v_i$  为  $\lambda_i$  的左特征向量,  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i)$ ;

[0031] 公式 (6) 如下所示:

[0032]  $Au_i = \lambda_i u_i$  (6)

[0033] 式中,  $u_i$  为  $\lambda_i$  的右特征向量;

[0034] 定义第  $k$  个状态变量  $x_k$  同第  $i$  个特征值  $\lambda_i$  的相关性的物理量, 公式 (7) 如下所示:

[0035]  $p_{ki} = \frac{v_{ki} u_{ki}}{v_i^T u_i}$  (7)

[0036] 式中,  $p_{ki}$  为参与因子,  $v_{ki}$ 、 $u_{ki}$  分别为左右特征向量的  $k$  行  $i$  列元素。

[0037] 公式 (8) 如下所示:

$$[0038] \quad \rho_i = \left| \frac{\sum_{X_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}}{\sum_{X_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki}} \right| \quad (8)$$

[0039] 式中,  $p_i$  为特征值  $\lambda_i$  的机电回路相关比。

[0040] 作为上述方案的改进, 根据如下公式 (9) 得到所述系统相关参数灵敏度;

$$[0041] \quad \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{v_i^T \frac{\partial A(\alpha)}{\partial \alpha}}{v_i^T u_i} \quad (9)$$

[0042] 式中,  $\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha}$  为系统相关参数灵敏度;  $\alpha$  为系统相关参数, 还包括发电机出力、电力系统静态稳定器的放大倍数。

[0043] 作为上述方案的改进, 当所述特征值  $\lambda_i$  满足如下公式 (10) 时, 系统振荡模式为低频振荡模式:

$$[0044] \quad \begin{cases} \rho_i > 1 \\ \lambda_i = \alpha + j\Omega \quad \Omega \in 0.2 - 2.5\text{Hz} \end{cases} \quad (10)。$$

[0045] 作为上述方案的改进, 还包括: 判断低频振荡模式下, 所述振荡阻尼比最大的运行控制方式; 将所述振荡阻尼比最大的运行控制方式作为所述交直流电力系统的运行控制方式。

[0046] 本发明实施例二对应提供了一种含 VSC-HVDC 的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置, 包括:

[0047] 系统建模模块, 用于对交直流电力系统进行建模, 得到系统动态模型;

[0048] 灵敏度计算模块, 用于根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵, 得到不同直流传输功率下 VSC-HVDC 系统相关参数灵敏度;

[0049] 参数调节模块, 用于判断所述 VSC-HVDC 系统相关参数灵敏度是否为正值, 若为正值, 减小所述 VSC-HVDC 系统相关参数, 以使所述振荡阻尼比增大; 若所述 VSC-HVDC 系统相关参数灵敏度为负值, 增大所述 VSC-HVDC 系统相关参数, 以使所述振荡阻尼比增大; 其中, 所述 VSC-HVDC 系统相关参数包括 VSC-HVDC 系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC 系统换流站输出无功功率和 VSC-HVDC 系统换流站直流电压。

[0050] 本发明实施例三对应提供了一种含 VSC-HVDC 的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置, 包括: 处理器、存储器以及存储在所述存储器中且被配置为由所述处理器执行的计算机程序, 所述处理器执行所述计算机程序时实现如本发明实施例一所述的含 VSC-HVDC 的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。

[0051] 本发明实施例四对应提供了一种计算机可读存储介质, 其特征在于, 所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序, 其中, 在所述计算机程序运行时控制所述计算机可读存储介质所在设备执行如本发明实施例一所述的含 VSC-HVDC 的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。

[0052] 本发明实施例提供的一种含 VSC-HVDC 的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法与现有技术相比, 具有如下有益效果:

[0053] 通过对交直流电力系统进行建模,能够同时引入交流和直流系统的变量,计及交直流混联系统中的交流系统的状态量对柔性直流输电系统的影响,从而使改善小干扰稳定性的准确度提高;通过计算振荡频率,将VSC-HVDC系统相关参数限定在低频振荡模式,能够针对低频振荡模式获得提高VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,根据VSC-HVDC系统相关参数灵敏度对VSC-HVDC系统相关参数进行调节以增大振荡阻尼,使系统相关参数的调节方法更加直观;通过建立包含交流系统的系统动态模型,计算得出考虑交流系统状态量的VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,能够更准确地改善系统的小干扰稳定性,提高系统运行稳定性、抑制低频振荡。

### 附图说明

[0054] 图1是本发明实施例一提供的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法的流程示意图。

[0055] 图2是一个具体的实施例中4机11节点系统图。

[0056] 图3是一个具体的实施例中区间振荡频率示意图。

[0057] 图4是一个具体的实施例中区间振荡阻尼比示意图。

[0058] 图5是一个具体的实施例中方式1、方式3、方式3与方式2下的小扰动转子角对比示意图。

[0059] 图6是一个具体的实施例中不同直流传输功率下阻尼对换流站交流母线电压的灵敏度示意图。

[0060] 图7是一个具体的实施例中不同直流传输功率下阻尼对换流站定无功的灵敏度示意图。

[0061] 图8是一个具体的实施例中不同直流传输功率下阻尼对直流电压的灵敏度示意图。

[0062] 图9是本发明实施例二提供的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置的结构示意图。

### 具体实施方式

[0063] 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作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。

[0064] 参见图1,是本发明一实施例提供的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法的流程示意图,包括:

[0065] S101、对交直流电力系统进行建模,得到系统动态模型;

[0066] S102、根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;

[0067] S103、判断所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值,若为正值,减小所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;

[0068] S104、若所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值,增大所述VSC-HVDC系统相关

参数,以使所述振荡阻尼比增大;其中,所述VSC-HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压。

[0069] 进一步的,所述系统动态模型如下式(1)所示:

$$[0070] \quad \dot{X} = AX \quad (1)$$

[0071] 式中, $X$ 为系统增量形式的状态变量, $A$ 为系统的状态矩阵。

[0072] 进一步的,根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,具体为:

[0073] 对所述系统动态模型中系统状态矩阵进行特征值分析,得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

[0074] 计算所述振荡频率为低频振荡频率时的左特征向量和右特征向量,并根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比;根据所述机电回路相关比判断系统工作模式是否为低频振荡模式:

[0075] 若是,根据所述参与因子、机电回路相关比和振荡阻尼比,计算不同直流传输功率下所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度。

[0076] 优选的,低频振荡频率为0.2~2.5Hz。

[0077] 进一步的,对所述系统状态矩阵进行特征值分析,通过如下公式(2)、公式(3)和公式(4)得到所述系统状态矩阵的特征值以及对应的振荡阻尼比和振荡频率;

[0078] 公式(2)如下所示:

$$[0079] \quad |\lambda I - A| = 0 \quad (2)$$

[0080] 式中, $\lambda$ 为矩阵 $A$ 的特征值,每一对特征值对应一种振荡模式, $I$ 为与 $A$ 同维数的单位矩阵;

[0081] 令特征值 $\lambda_i = \delta_i + j\omega_i$ ,公式(3)如下所示:

$$[0082] \quad \xi = -\frac{\delta_i}{\sqrt{\delta_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3)$$

[0083] 式中, $\xi$ 为振荡阻尼比;

[0084] 公式(4)如下所示:

$$[0085] \quad f = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (4)$$

[0086] 式中, $f$ 为振荡频率;

[0087] 根据公式(5)和公式(6)计算所述振荡频率为低频振荡时的所述左特征向量和右特征向量,并通过公式(7)和公式(8)根据所述左特征向量和右特征向量得到参与因子和机电回路相关比;

[0088] 公式(5)如下所示:

$$[0089] \quad v_i^T \Lambda = v_i^T \lambda_i \quad (5)$$

[0090] 式中, $v_i$ 为 $\lambda_i$ 的左特征向量, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2 \cdots \lambda_i)$ ;

[0091] 公式(6)如下所示:

$$[0092] \quad A u_i = \lambda_i u_i \quad (6)$$

[0093] 式中, $u_i$ 为 $\lambda_i$ 的右特征向量;

[0094] 定义第k个状态变量 $x_k$ 同第i个特征值 $\lambda_i$ 的相关性的物理量,公式(7)如下所示:

$$[0095] \quad p_{ki} = \frac{v_{ki} u_{ki}}{v_i^T u_i} \quad (7)$$

[0096] 式中, $p_{ki}$ 为参与因子, $v_{ki}$ 、 $u_{ki}$ 分别为左右特征向量的k行i列元素。

[0097] 公式(8)如下所示:

$$[0098] \quad \rho_i = \frac{\left| \sum_{X_k \in (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki} \right|}{\left| \sum_{X_k \notin (\Delta\omega, \Delta\delta)} p_{ki} \right|} \quad (8)$$

[0099] 式中, $\rho_i$ 为特征值 $\lambda_i$ 的机电回路相关比。

[0100] 进一步的,根据如下公式(9)得到所述系统相关参数灵敏度;

$$[0101] \quad \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{v_i^T \frac{\partial A(\alpha)}{\partial \alpha}}{v_i^T u_i} \quad (9)$$

[0102] 式中, $\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha}$ 为系统相关参数灵敏度; $\alpha$ 为系统相关参数,还包括发电机出力、电力系统静态稳定器的放大倍数。

[0103] 进一步的,当所述特征值 $\lambda_i$ 满足如下公式(10)时,系统振荡模式为低频振荡模式:

$$[0104] \quad \begin{cases} \rho_i > 1 \\ \lambda_i = \alpha + j\Omega \quad \Omega \in 0.2 - 2.5\text{Hz} \end{cases} \quad (10)。$$

[0105] 进一步的,还包括:判断低频振荡模式下,所述振荡阻尼比最大的运行控制方式;将所述振荡阻尼比最大的运行控制方式作为所述交直流电力系统的运行控制方式。

[0106] 在一个具体的实施例中,对于双端柔性直流输电系统,以修改的4机11节点系统为例,混合系统如图3所示,在原4机11节点系统的7、9节点之间,加入两端直流输电系统。其中,换流站1有功运行控制方式为定有功功率,参考值范围200-280MW,换流站2为定直流电压控制方式,参考值为100kV。两换流站的阻抗值都设为1pu,两换流站最大桥臂内电压设为1.07pu,无功功率上限取值300Mvar,下限取值-300Mvar,交流电压控制斜率取值为0。该柔性直流输电系统的详细参数如表1所示:

[0107] 表1

	参数名称	数值	参数名称	数值
	TPO(VSC#1)	0.05	AC_VC_LIMITS (# 2)	0
	AC_VC_LIMITS (# 1)	0	AC_VCTRL_KP (VSC #2)	2.4
	AC_VCTRL_KP (#1)	2.4	TAC (VSC # 2)	0.01
	TAC (VSC # 1)	0.01	TACM (VSC # 2)	0.09
	TACM (VSC # 1)	0.09	IACMAX (VSC # 2)	1
	IACMAX (VSC # 1)	1	DROOP (VSC # 2)	0
[0108]	DROOP (VSC # 1)	0	VCMX (VSC # 2)	1.07
	VCMX (VSC # 1)	1.07	XREACT (VSC #2)	1
	XREACT (VSC #1)	1	QMAX (VSC # 2)	300
	QMAX (VSC # 1)	300	QMIN (VSC # 2)	-300
	QMIN (VSC # 1)	-300	AC_VC_KT (VSC # 2)	1.2
	AC_VC_KT (VSC # 1)	1.2	AC_VC_KTP (VSC # 2)	1
	AC_VC_KTP (VSC # 1)	1	TPO (DC LINE)	0.05
	TPO (VSC # 2)	0.05	TPO_LIM (DC LINE)	0

[0109] 运行控制方式如下表2所示:

[0110] 表2

	换流站 1		换流站 2		
	方式 1	定有功功率	定无功功率	定直流电压	定无功功率
[0111]	方式 2	定有功功率	定交流电压	定直流电压	定无功功率
	方式 3	定有功功率	定无功功率	定直流电压	定交流电压
	方式 4	定有功功率	定交流电压	定直流电压	定交流电压

[0112] 基态下,特征值分析结果表明:该系统在不同运行方式下,共有3个机电振荡模式,分别为: $f_1=0.517-0.587\text{Hz}$ , $\xi_1=0.0097-0.0465$ 的区间振荡模式,在该振荡模式下,发电机1和2与发电机3和4相对运动; $f_2=1.026\text{Hz}-1.063\text{Hz}$ , $\xi_2=0.053-0.076$ 为局部振荡模式,该模式下,发电机1与发电机2相对运动; $f_3=1.008-1.162\text{Hz}$ , $\xi_3=0.051-0.072$ 为局部振荡模式,该模式下发电机3与发电机4相对运动。选取该系统区间振荡模式进行分析,不同的柔性直流输电运行控制方式下,区域间振荡模式的振荡频率 $f_1$ 和阻尼比 $\xi_1$ 随柔性直流输电系统传输功率变化趋势如图3和4所示。图3为该区间振荡模式下的振荡频率,由图可知:方式4的运行控制方式下,在传输功率200MW时,区域间振荡频率为0.592Hz,在传输功率为280MW时,区域间振荡频率为0.594Hz,系统的区域间振荡随着直流传输功率的增大而略微增大;方式1与方式3的频率较为接近,变化范围为0.559-0.570Hz;方式2的运行控制方式下,在传输功率200MW时,区域间振荡频率为0.569Hz,在传输功率280MW时,区域间振荡频率为0.560Hz,系统的振荡频率均随着直流传输功率增大而减小;在直流传输功率从200MW到280MW增大过程中,方式4的振荡频率一直大于其它三种运行控制方式。四种运行控制方式的区域间振荡频率变化范围均在0.519Hz-0.595Hz之间。

[0113] 图4为不同控制方式下的系统区间振荡模式的阻尼比:在方式2运行控制方式下,传输功率为200MW时,区域间振荡模式阻尼比为0.0392;在传输功率为280MW时,区域间振荡模式阻尼比为0.0443,系统区域间振荡模式阻尼比随着直流传输功率的增大而增大;方式1与方式3在传输功率为200MW时,区域间振荡模式阻尼比为0.024,在传输功率为280MW时,区

域间振荡模式阻尼比为0.025,随着直流传输功率增大,区域间振荡模式阻尼比增大趋势平缓;方式4在传输功率为200MW时,区域间振荡模式阻尼比为0.0091,在传输功率为280MW时,区域间振荡模式阻尼比为0.025,随着直流传输功率的增大,区域间振荡模式阻尼比增大趋势显著,该现象表明:适当增大VSC-HVDC所传输的有功功率可有效提高系统区域间低频振荡的阻尼比,改善系统的动态稳定性。

[0114] 在直流传输功率为200MW时,4种运行控制方式的阻尼分别为0.024、0.0392、0.024、0.0091;在直流传输功率为280MW时,4种运行控制方式的阻尼分别为0.025、0.0443、0.025、0.025;在直流传输功率从200-280MW增大过程中,方式2即在换流站1定有功功率和定交流电压,换流站2定直流电压和定无功功率的阻尼一直大于方式1、3、4,而方式1、3、4的阻尼值较为接近,反映了在区间振荡模式下,同一传输功率,不同运行控制方式中,方式2即换流站1定有功功率和交流电压,换流站2定直流电压和无功功率运行控制方式的系统阻尼特性最好,为最佳阻尼运行控制方式。

[0115] 为验证柔性直流输电系统采用运行控制方式2时具有良好的区域间振荡阻尼特性,进一步对其进行故障验证。以发电机1为参考机,5s时母线10、11相连的线路发生三相短路,短路持续时间0.1s,即在时间5.1s时短路故障切除。不同运行控制方式下,发电机3的转子角振荡曲线如图5所示。由图5可见,在5s时系统发生扰动,各种柔性直流输电系统运行控制方式下,发电机转子角均发生摇摆,切除扰动,仿真持续到50s时。方式2下的相对转子角恢复稳态,持续到55s时方式1、3、4下的相对转子角才恢复稳态;发生扰动后,方式1、2、3、4的转子角幅值超调量分别为44.7%、41.8%、44.9%、42.1%;在方式2下,系统恢复至稳态的时间最短,超调量最小,反映了采用方式2运行控制方式,系统具有良好的区域间振荡阻尼特性。

[0116] 方式2运行控制方式下,改变直流传输功率,计算区域振荡模式阻尼比对柔性直流输电系统参数的灵敏度。在保持换流站交流换流母线电压为定值,不同直流传输功率下,区域间振荡模式阻尼比对交流换流母线电压的灵敏度如图6所示;在保持换流站无功功率为定值,不同直流传输功率下,阻尼对换流站定无功的灵敏度如图7所示;在保持换流站直流电压为定值,不同直流传输功率下,阻尼对直流电压的灵敏度如图8所示。

[0117] 由图6可知,区域振荡模式下,阻尼比对交流电压的灵敏度均为正值,且灵敏度的值随着直流传输功率的增大而增大,说明适当增大交流电压,可提高系统区域间振荡模式的阻尼比。由图7可知:阻尼对直流传输无功功率的灵敏度值为负,说明适当减小直流传输无功功率,可改善系统区域振荡阻尼特性。由图8可知:区域间振荡模式的阻尼比对直流电压的灵敏度均为负值,并且随着直流传输功率的增大而减小,说明适当减小直流电压,可提高系统区域间振荡模式的阻尼比。

[0118] 由以上分析可知,在该具体的实施例中:双端柔性直流输电系统中,一侧换流站定有功功率和交流电压,另一侧换流站定直流电压和无功功率运行控制方式为改善系统区域间振荡阻尼特性的最佳柔性直流输电运行控制方式;适当增大交流电压、减小直流传输无功、减小直流电压均可改善系统的阻尼特性。

[0119] 本发明实施例提供的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法及装置与现有技术相比,具有如下有益效果:

[0120] 通过对交直流电力系统进行建模,能够同时引入交流和直流系统的变量,计及交

直流混联系统中的交流系统的状态量对柔性直流输电系统的影响,从而使改善小干扰稳定性的准确度提高;通过计算振荡频率,将VSC-HVDC系统相关参数限定在低频振荡模式,能够针对低频振荡模式获得提高VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,根据VSC-HVDC系统相关参数灵敏度对VSC-HVDC系统相关参数进行调节以增大振荡阻尼,使系统相关参数的调节方法更加直观;通过建立包含交流系统的系统动态模型,计算得出考虑交流系统状态量的VSC-HVDC系统相关参数灵敏度,能够更准确地改善系统的小干扰稳定性,提高系统运行稳定性、抑制低频振荡。

[0121] 参见图9,是本发明实施例二提供的一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置的结构示意图,包括:

[0122] 系统建模模块201,用于对交直流电力系统进行建模,得到系统动态模型;

[0123] 灵敏度计算模块202,用于根据所述系统动态模型中的系统状态矩阵,得到不同直流传输功率下VSC-HVDC系统相关参数灵敏度;

[0124] 参数调节模块203,用于判断所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度是否为正值,若为正值,减小所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;若所述VSC-HVDC系统相关参数灵敏度为负值,增大所述VSC-HVDC系统相关参数,以使所述振荡阻尼比增大;其中,所述VSC-HVDC系统相关参数包括VSC-HVDC系统换流站交流母线电压、VSC-HVDC系统换流站输出无功功率和VSC-HVDC系统换流站直流电压。

[0125] 本发明实施例三对应提供了一种含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置,包括处理器、存储器以及存储在所述存储器中且被配置为由所述处理器执行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如本发明实施例一所述的含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。所述含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置可以是桌上型计算机、笔记本、掌上电脑及云端服务器等计算设备。所述含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置可包括,但不限于,处理器、存储器。

[0126] 本发明实施例四对应提供了一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质包括存储的计算机程序,其中,在所述计算机程序运行时控制所述计算机可读存储介质所在设备执行如本发明实施例一所述的含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化方法。

[0127] 所称处理器可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等,所述处理器是所述含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置的控制中心,利用各种接口和线路连接整个含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置的各个部分。

[0128] 所述存储器可用于存储所述计算机程序和/或模块,所述处理器通过运行或执行存储在所述存储器内的计算机程序和/或模块,以及调用存储在存储器内的数据,实现所述含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置的各种功能。所述存储器可主要包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需的应用程

序(比如声音播放功能、图像播放功能等)等;存储数据区可存储根据手机的使用所创建的数据(比如音频数据、电话本等)等。此外,存储器可以包括高速随机存取存储器,还可以包括非易失性存储器,例如硬盘、内存、插接式硬盘,智能存储卡(Smart Media Card,SMC),安全数字(Secure Digital,SD)卡,闪存卡(Flash Card)、至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他易失性固态存储器件。

[0129] 其中,所述含VSC-HVDC的交直流混联系统小干扰稳定性优化装置集成的模块/单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明实现上述实施例方法中的全部或部分流程,也可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的计算机程序可存储于一计算机可读存储介质中,该计算机程序在被处理器执行时,可实现上述各个方法实施例的步骤。其中,所述计算机程序包括计算机程序代码,所述计算机程序代码可以为源代码形式、对象代码形式、可执行文件或某些中间形式等。所述计算机可读介质可以包括:能够携带所述计算机程序代码的任何实体或装置、记录介质、U盘、移动硬盘、磁碟、光盘、计算机存储器、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、电载波信号、电信信号以及软件分发介质等。

[0130] 需说明的是,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。另外,本发明提供的装置实施例附图中,模块之间的连接关系表示它们之间具有通信连接,具体可以实现为一条或多条通信总线或信号线。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0131] 以上所述是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也视为本发明的保护范围。

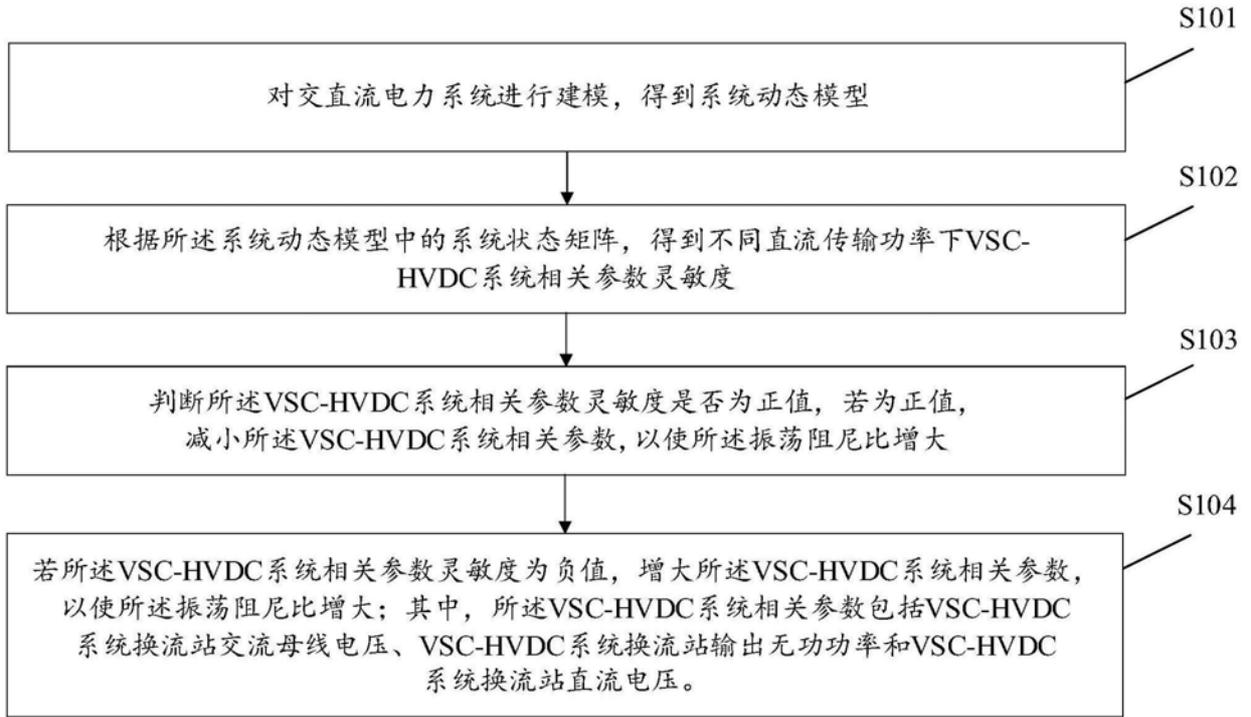


图1

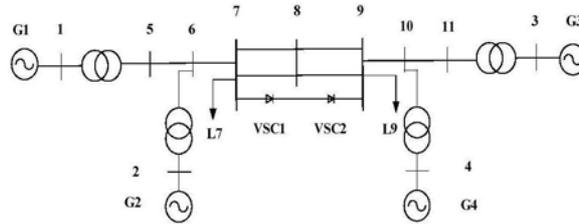


图2

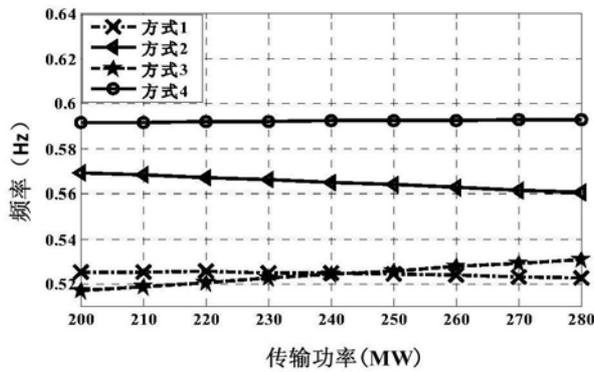


图3

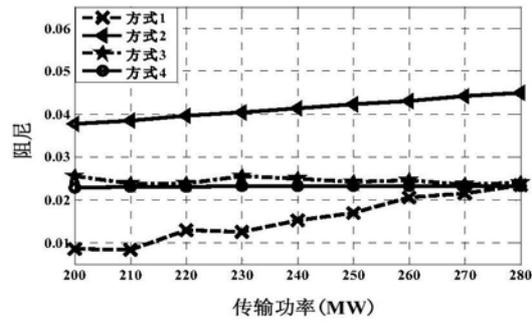


图4

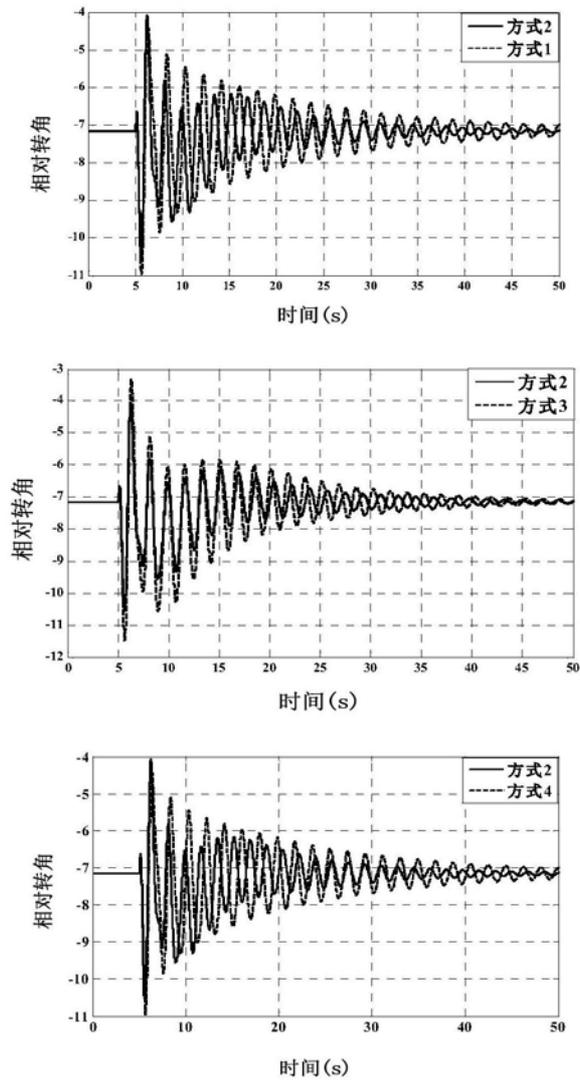


图5

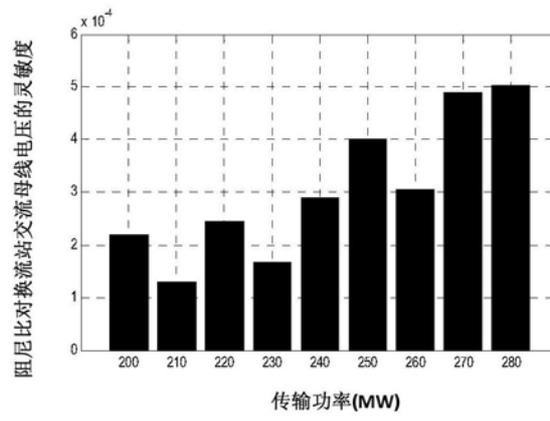


图6

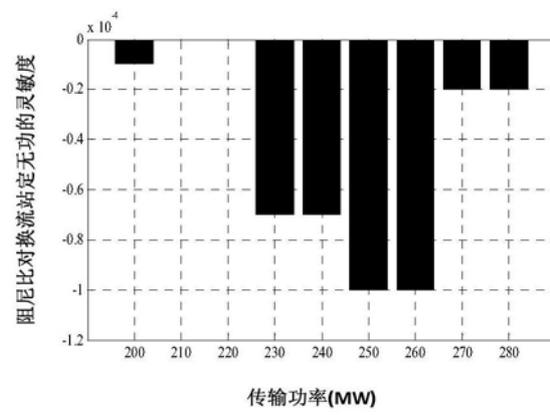


图7

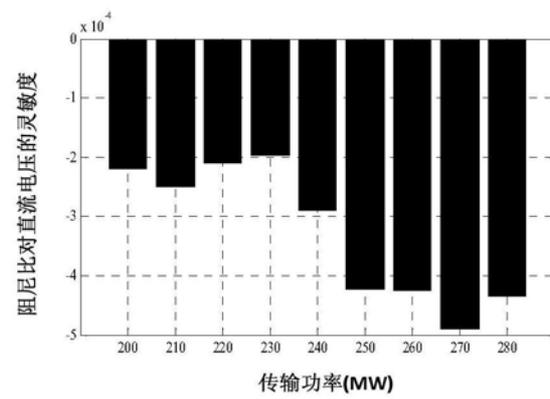


图8

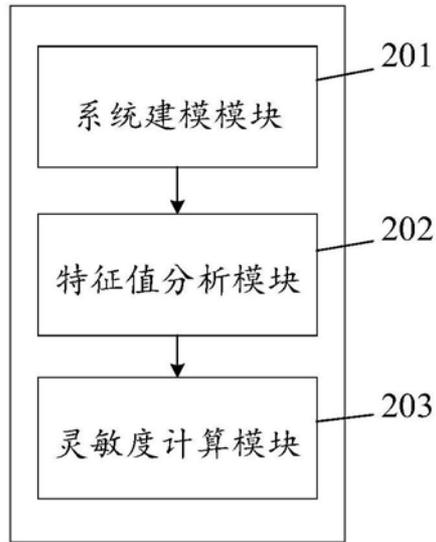


图9