



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 111224411 B

(45)授权公告日 2020.08.11

(21)申请号 202010329815.X

(22)申请日 2020.04.24

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 111224411 A

(43)申请公布日 2020.06.02

(73)专利权人 中国电力科学研究院有限公司  
地址 100192 北京市海淀区清河小营东路  
15号

(72)发明人 张健 李文锋 贺静波 金一丁  
魏巍 贾媛 李莹 陶向宇  
王官宏 霍乾涛

(74)专利代理机构 北京工信联合知识产权代理  
有限公司 11266  
代理人 姜丽楼

(51)Int.Cl.

H02J 3/24(2006.01)

(56)对比文件

- CN 109473997 A, 2019.03.15
- CN 102064548 A, 2011.05.18
- CN 110854926 A, 2020.02.28
- CN 106910142 A, 2017.06.30
- CN 106374496 A, 2017.02.01
- CN 105048511 A, 2015.11.11
- US 2019006848 A1, 2019.01.03

审查员 宋静婧

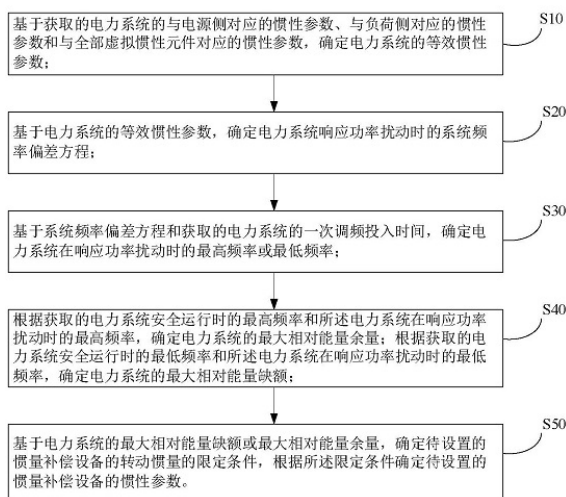
权利要求书4页 说明书17页 附图4页

(54)发明名称

电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置

(57)摘要

本发明公开电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置。该方法包括：确定电力系统的等效惯性参数；确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程；基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间，确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率；确定电力系统的最大相对能量余量；确定电力系统的最大相对能量缺额；确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件，根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数；其中，所述惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点，并且所述惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化。该方法对计算资源的需求低、求解效率高、准确度高。



1. 一种电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述方法包括:

基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;

基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程,其中,所述系统频率偏差方程用于表征电力系统在响应功率扰动时,系统频率偏差的绝对值的递增趋势;

基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;

其中,最高频率为电力系统在响应负荷侧故障时的最大正向频率偏差与系统频率额定值这二者之和;

其中,最低频率为电力系统在响应电源侧故障时的最大反向频率偏差与系统频率额定值这二者之和;

根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量,其中,电力系统的最大相对能量余量为由最高安全机械转速、最高预期机械转速及电力系统的等效转动惯量计算得到的转动动能之差;

根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额,其中,电力系统的最大相对能量缺额为由最低安全机械转速、最低预期机械转速及电力系统的等效转动惯量计算得到的转动动能之差;

基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数;

其中,所述惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点,并且所述惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化;

所述限定条件包括:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可释放的转动动能最大值不小于所述最大相对能量缺额;或

根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可存储的转动动能最大值不小于所述最大相对能量余量;

所述根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数,具体包括:

获取电力系统内新能源场站的数量,并作为待配置的惯量补偿设备的数量;

根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可存储的转动动能最大值等于所述最大相对能量余量时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量余量值;

根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可释放的转动动能最大值等于所述最大相对能量缺额时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量缺额值;

确定名义转动惯量的最小能量余量值和名义转动惯量的最小能量缺额值中的较大值为电力系统内待配置的惯量补偿设备的的名义转动惯量。

2. 根据权利要求1所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数,具体包括:

获取电力系统内每个同步发电机组的惯性参数和额定容量；

获取每个同步调相机的惯性参数和额定容量；

基于每个同步发电机组的惯性参数和额定容量,以及每个同步调相机的惯性参数和额定容量,确定与电源侧对应的惯性参数；

获取电力系统内每个同步电动机的惯性参数和额定容量；

基于电力系统的动态响应过程,确定除同步电动机之外的其他在负荷侧提供惯量支撑的旋转部件的惯性参数和额定容量；

基于每个同步电动机的惯性参数和额定容量,以及除同步电动机之外的其他在负荷侧提供惯量支撑的旋转部件的惯性参数和额定容量,确定电力系统内与负荷侧对应的惯性参数；

获取电力系统内每个虚拟惯性元件的虚拟惯性参数和额定容量；

基于每个虚拟惯性元件的虚拟惯性参数和额定容量,确定电力系统的与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数；

根据电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数。

3. 根据权利要求1所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程,具体包括:

获取电力系统频率偏差的初始值、电力系统的功率扰动以及电力系统的等值阻尼系数；

基于所述电力系统频率偏差的初始值、电力系统的功率扰动、电力系统的等值阻尼系数以及所述电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程。

4. 根据权利要求3所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述基于所述系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率,具体包括:

获取电力系统在发生负荷侧故障时的最大不平衡功率；

获取电力系统稳定运行时的正向频率偏差上限；

根据一次调频投入时间、正向频率偏差上限、和电力系统在发生负荷侧故障时的最大不平衡功率,基于所述系统频率偏差方程,确定电力系统在响应负荷侧故障时的最大正向频率偏差；

确定最大正向频率偏差与系统频率额定值这二者之和为电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率。

5. 根据权利要求3所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述基于所述系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最低频率,具体包括:

获取电力系统在发生电源侧故障时的最大不平衡功率；

获取电力系统稳定运行时的反向频率偏差下限；

根据一次调频投入时间、反向频率偏差下限、和电力系统在发生电源侧故障时的最大不平衡功率,基于所述系统频率偏差方程,确定电力系统在响应电源侧故障时的最大反向

频率偏差；

确定最大反向频率偏差与系统频率额定值这二者之和为电力系统在响应电源侧故障时的最低频率。

6. 根据权利要求4所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量,具体包括:

根据获取的电力系统内同步发电机组的额定机械转速和电力系统的等效惯性参数,确定电力系统内与全部的惯性元件整体上对应的等效转动惯量;

确定与电力系统安全运行时的最高频率对应的最高安全机械转速;

确定与电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率对应的最高预期机械转速;

确定根据所述最高安全机械转速、所述最高预期机械转速及所述等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量余量。

7. 根据权利要求5所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额,具体包括:

根据获取的电力系统内同步发电机组的额定机械转速和电力系统的等效惯性参数,确定电力系统内与全部的惯性元件整体上对应的等效转动惯量;

确定与电力系统安全运行时的最低频率对应的最低安全机械转速;

确定与电力系统在响应电源侧故障时的最低频率对应的最低预期机械转速;

确定根据所述最低安全机械转速、所述最低预期机械转速、及所述等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量缺额。

8. 根据权利要求1所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述基于所述电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,具体包括:

根据惯量补偿设备在响应电源侧故障时的工作原理,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可释放的转动动能最大值不小于所述最大相对能量缺额;或

根据惯量补偿设备在响应负荷侧故障时的工作原理,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可存储的转动动能最大值不小于所述最大相对能量余量。

9. 根据权利要求8所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,所述根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数,还包括:

根据待配置惯量补偿设备的名义转动惯量、待配置惯量补偿设备的新能源场站的额定容量和待配置惯量补偿设备的额定转速,确定待配置的惯量补偿设备的标么值下惯性时间常数。

10. 一种电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定装置,包括:

电力系统的等效惯性参数确定单元,用于基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;系统频率偏差方程确定单元,用于基于电力系统的等效惯性参数,确定电力

系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程；其中，所述系统频率偏差方程用于表征电力系统在响应功率扰动时，系统频率偏差的绝对值的递增趋势；

最高频率或最低频率确定单元，用于基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间，确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率；其中，最高频率为电力系统在响应负荷侧故障时的最大正向频率偏差与系统频率额定值二者之和；

其中，最低频率为电力系统在响应电源侧故障时的最大反向频率偏差与系统频率额定值二者之和；

最大相对能量缺额/最大相对能量余量确定单元，用于根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率，确定电力系统的最大相对能量余量；根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率，确定电力系统的最大相对能量缺额；其中，电力系统的最大相对能量余量为由最高安全机械转速、最高预期机械转速及电力系统的等效转动惯量计算得到的转动动能之差；电力系统的最大相对能量缺额为由最低安全机械转速、最低预期机械转速及电力系统的等效转动惯量计算得到的转动动能之差；

惯量补偿设备的惯性参数确定单元，用于基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量，确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件，根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数；

其中，所述惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点，并且所述惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化；

所述限定条件包括：根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可释放的转动动能最大值不小于所述最大相对能量缺额；或

根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可存储的转动动能最大值不小于所述最大相对能量余量；

所述根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数，具体包括：

获取电力系统内新能源场站的数量，并作为待配置的惯量补偿设备的数量；

根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量，确定可存储的转动动能最大值等于所述最大相对能量余量时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量余量值；

根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量，确定可释放的转动动能最大值等于所述最大相对能量缺额时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量缺额值；

确定名义转动惯量的最小能量余量值和名义转动惯量的最小能量缺额值中的较大值为电力系统内待配置的惯量补偿设备的的名义转动惯量。

11. 一种计算机存储介质，其上存储有计算机程序，所述计算机程序用于实现如权利要求1至9中任一项所述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法。

## 电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统运行及控制技术领域,尤其涉及电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置。

### 背景技术

[0002] 英国在2019年8月9日发生了大停电事故。其过程大致如下:由于某种原因,北海电网内的小巴德福(Little Barford)燃气电站停机。在燃气电站脱网后,电网损失的发电负荷使得电力系统频率降低。另一方面,由于北海电网内风机耐受低频的能力不足,电力系统频率降低导致风机大量脱网,因此风电场出力骤降,并进一步增加了电网损失的发电负荷,导致系统频率继续下降,并最终触发北海电网内设置的低频减载设备动作而切除部分用电负荷。

[0003] 与北海电网相似,目前新能源在我国电网中的渗透率也越来越高,但新能源接入比高的电力系统普遍存在惯量支撑不足的问题。一旦系统频率发生快速变化,这类新能源接入比高的电网发生继发停电事故的风险很大。

[0004] 目前,电力系统中的惯量支撑主要来自常规的同步发电机和同步调相机,尚未有评价电力系统惯量支撑不足程度的方法及确定向电力系统中配置惯量补偿设备的惯性参数的方法。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置,旨在解决电力系统惯量支撑不足的问题。

[0006] 第一方面,本发明提供一种电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,包括以下步骤:

[0007] 基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;

[0008] 基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程;

[0009] 基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;

[0010] 根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量;根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额;

[0011] 基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数;

[0012] 其中,所述惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点,并且所述惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化。

- [0013] 第二方面,本发明提供一种电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定装置,包括:
- [0014] 电力系统的等效惯性参数确定单元,用于基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;
- [0015] 系统频率偏差方程确定单元,用于基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程;
- [0016] 最高频率或最低频率确定单元,用于基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;
- [0017] 最大相对能量缺额/最大相对能量余量确定单元,用于根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量;根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额;
- [0018] 惯量补偿设备的惯性参数确定单元,用于基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数;
- [0019] 其中,所述惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点,并且所述惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化。
- [0020] 第三方面,本发明提供一种计算机存储介质,其上存储有计算机程序,所述计算机程序用于实现在第一方面中说明的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法。
- [0021] 本发明提供的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法及装置,提取待评价电力系统中的惯量支撑因素(包括与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数),确定电力系统的等效惯性参数;基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程;基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量;根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和所述电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额;基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据所述限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数。该惯性参数确定方法全面考虑了电网运行中的极限工况,对电网运行剖面的覆盖率高;该方法对计算资源的需求低、求解效率高、准确度高。
- [0022] 待评价电力系统中配置具有前述惯性参数的惯量补偿设备后,可抑制系统频率快速波动,避免电网内的新能源场站因系统频率过低而触发保护而脱网或因系统频率过高而主动将新能源场站脱网,以及因切机或减载导致的停电事故,提升了电网的频率稳定性,适合在新能源占比高的电网中全面推广。

## 附图说明

- [0023] 通过参考下面的附图,可以更为完整地理解本发明的示例性实施方式:
- [0024] 图 1 为本发明优选实施方式的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法的

流程示意图；

[0025] 图 2 是本发明优选实施方式的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定装置的组成示意图；

[0026] 图 3 为某新能源汇集区域经特高压直流送出的送端电网的典型示意图；

[0027] 图 4 为应用本发明优选实施方式的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法之前和应用之后，该送端电网在电源侧故障时的频率动态响应过程示意图；

[0028] 图 5 为应用本发明优选实施方式的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法之前和应用之后，该送端电网在负荷侧故障时的频率动态响应过程示意图。

### 具体实施方式

[0029] 现在参考附图介绍本发明的示例性实施方式，然而，本发明可以用许多不同的形式来实施，并且不局限于此处描述的实施例，提供这些实施例是为了详尽地且完全地公开本发明，并且向所属技术领域的技术人员充分传达本发明的范围。对于表示在附图中的示例性实施方式中的术语并不是对本发明的限定。在附图中，相同的单元/元件使用相同的附图标记。

[0030] 除非另有说明，此处使用的术语（包括科技术语）对所属技术领域的技术人员具有通常的理解含义。另外，可以理解的是，以通常使用的词典限定的术语，应当被理解为其相关领域的语境具有一致的含义，而不应被理解为理想化的或过于正式的意义。

[0031] 我国电网构建复杂，交直流、多直流、送受端相互影响，电网运行特性复杂，控制难度大，大电网稳定运行面临严峻考验。尤其在新能源高占比的电网中，新能源并网导致的电网安全问题相对严重。

[0032] 为描述方便，引入惯量补偿设备来对本发明实施例的方法进行说明。具体地，该惯量补偿设备设置在电网中新能源场站的并网点，向电力系统提供惯量支撑。与提供质量的质点、提供动量的质点或提供动能的质点相似，该惯量补偿设备可以被抽象为提供转动惯量或惯量容量（为惯性时间常数与额定容量的乘积）的惯性元件。在电力系统响应功率扰动的过程中，惯量补偿设备受控于控制元件，在一次调频投入之前，向电网提供惯量支撑。

[0033] 具体地，该惯量补偿设备具有两类典型的工作模式：

[0034] 1)、在系统发生电源侧故障时，在一次调频投入之前，该惯量补偿设备以转动动量及转动动能的形式释放机械能。在一次调频投入之后，该惯量补偿设备退出系统频率调节。在一次调频投入之前，由该惯量补偿设备释放的机械能被转换为电能并注入到电力系统中，向电网提供惯量支撑。

[0035] 2) 在系统发生负荷侧故障时，在一次调频投入之前，该惯量补偿设备从电力系统中吸收能量，并存储为转动动能。在一次调频投入之后，该惯量补偿设备退出系统频率调节。在一次调频投入之前，该惯量补偿设备增加的转动动能由电力系统中的多余能量转换而来，因此，该惯量补偿设备向电力系统提供了惯量支撑。

[0036] 具体实施时，电力系统中设置本发明实施例方法确定的惯性参数对应的惯量补偿设备后，该电力系统将具有充分的惯量支撑。在功率波动时，设置的惯量补偿设备受控于控制元件而动作，从而避免系统频率快速波动，从而避免电网内新能源场站因低频减载导致停电事故，或避免电网内新能源场站因高频切机而导致风能光能浪费，提升了电网的频率



稳定性及电网运行安全。

[0037] 应该理解为,这里的控制元件可以根据针对惯量补偿设备的控制需求,采用为本领域技术人员所知的方法来实现,这里不再赘述。

[0038] 如图1所示,本发明实施例的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法,包括:

[0039] 步骤S10:基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;

[0040] 步骤S20:基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程;

[0041] 步骤S30:基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;

[0042] 步骤S40:根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量;根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额;

[0043] 步骤S50:基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数;

[0044] 其中,惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点,并且惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化。

[0045] 进一步地,该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中,基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数,具体包括:

[0046] 获取电力系统内每个同步发电机组的惯性参数和额定容量;

[0047] 获取每个同步调相机的惯性参数和额定容量;

[0048] 基于每个同步发电机组的惯性参数和额定容量,以及每个同步调相机的惯性参数和额定容量,确定与电源侧对应的惯性时间常数;

[0049] 获取电力系统内每个同步电动机的惯性参数和额定容量;

[0050] 基于电力系统的动态响应过程,确定除外同步发动机之外的其他在负荷侧提供惯量支撑的旋转部件的惯性参数和额定容量;

[0051] 基于每个同步电动机的惯性参数和额定容量,以及除外同步发动机之外的其他在负荷侧提供惯量支撑的旋转部件的惯性参数和额定容量,确定电力系统内与负荷侧对应的惯性参数;

[0052] 获取电力系统内每个虚拟惯性元件的虚拟惯性参数和额定容量;

[0053] 基于每个虚拟惯性元件的虚拟惯性参数和额定容量,确定电力系统内与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数;

[0054] 根据电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数。

[0055] 进一步地,该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中,基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程,具体包括:

[0056] 获取电力系统频率偏差的初始值、电力系统的功率扰动以及电力系统的等值阻尼系数；

[0057] 基于电力系统频率偏差的初始值、电力系统的不平衡功率、电力系统的等值阻尼系数以及电力系统的等效惯性参数，确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程；

[0058] 其中，系统频率偏差方程用于表征电力系统在响应功率扰动时，系统频率偏差的绝对值的递增趋势。

[0059] 进一步地，该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中，基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间，确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率，具体包括：

[0060] 获取电力系统在发生负荷侧故障时的最大不平衡功率；

[0061] 获取电力系统稳定运行时的正向频率偏差上限；

[0062] 根据一次调频投入时间、正向频率偏差上限、和电力系统在发生负荷侧故障时的最大不平衡功率，基于系统频率偏差方程，确定电力系统在响应负荷侧故障时的最大正向频率偏差；

[0063] 确定最大正向频率偏差与系统频率额定值这二者之和为电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率。

[0064] 进一步地，该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中，基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间，确定电力系统在响应功率扰动时的最低频率，具体包括：

[0065] 获取电力系统在发生电源侧故障时的最大不平衡功率；

[0066] 获取电力系统稳定运行时的反向频率偏差下限；

[0067] 根据一次调频投入时间、反向频率偏差下限、和电力系统在发生电源侧故障时的最大不平衡功率，基于系统频率偏差方程，确定电力系统在响应电源侧故障时的最大反向频率偏差；

[0068] 确定最大反向频率偏差与系统频率额定值这二者之和为电力系统在响应电源侧故障时的最低频率。

[0069] 进一步地，该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中，根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和电力系统在响应功率扰动时的最高频率，确定电力系统的最大相对能量余量，具体包括：

[0070] 根据获取的电力系统内同步发电机组的额定机械转速和电力系统的等效惯性参数，确定电力系统内与全部的惯性元件整体上对应的等效转动惯量；

[0071] 确定与电力系统安全运行时的最高频率对应的最高安全机械转速；

[0072] 确定与电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率对应的最高可能机械转速；

[0073] 确定根据最高安全机械转速、最高可能机械转速及等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量余量。

[0074] 进一步地，该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中，根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和电力系统在响应功率扰动时的最低频率，确定电力系统的最大相对能量缺额，具体包括：

[0075] 根据获取的电力系统内同步发电机组的额定机械转速和电力系统的等效惯性参

数,确定电力系统内与全部的惯性元件整体上对应的等效转动惯量;

[0076] 确定与电力系统安全运行时的最低频率对应的最低安全机械转速;

[0077] 确定与电力系统在响应电源侧故障时的最低频率对应的最低可能机械转速;

[0078] 确定根据最低安全机械转速、最低可能机械转速、及等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量缺额。

[0079] 进一步地,该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中,基于电力系统的最大相对能量缺额/或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,具体包括:

[0080] 根据惯量补偿设备在响应电源侧故障时的工作原理,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可释放的转动动能最大值不小于最大相对能量缺额;或

[0081] 根据惯量补偿设备在响应负荷侧故障时的工作原理,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可存储的转动动能最大值不小于最大相对能量余量。

[0082] 进一步地,该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中,根据限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数,具体包括:

[0083] 获取电力系统内新能源场站的数量,并作为待配置的惯量补偿设备的数量;

[0084] 根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可存储的转动动能最大值等于最大相对能量余量时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量余量值;

[0085] 根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可释放的转动动能最大值等于最大相对能量缺额时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量缺额值;

[0086] 确定名义转动惯量的最小能量余量值和名义转动惯量的最小能量缺额值中的较大值为电力系统内待配置的惯量补偿设备的的名义转动惯量。

[0087] 进一步地,该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法中,根据限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数,还包括:

[0088] 根据待配置惯量补偿设备的的名义转动惯量、待配置惯量补偿设备的新能源场站的额定容量和待配置惯量补偿设备的额定转速,确定待配置的惯量补偿设备的标么值下惯性时间常数。

[0089] 如图2所示,本发明实施例的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定装置,包括:

[0090] 电力系统的等效惯性参数确定单元100,用于基于获取的电力系统的与电源侧对应的惯性参数、与负荷侧对应的惯性参数和与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数,确定电力系统的等效惯性参数;

[0091] 系统频率偏差方程确定单元200,用于基于电力系统的等效惯性参数,确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程 ;

[0092] 最高频率或最低频率确定单元300,用于基于系统频率偏差方程和获取的电力系统的一次调频投入时间,确定电力系统在响应功率扰动时的最高频率或最低频率;

[0093] 最大相对能量缺额/最大相对能量余量确定单元400,用于根据获取的电力系统安全运行时的最高频率和电力系统在响应功率扰动时的最高频率,确定电力系统的最大相对能量余量;根据获取的电力系统安全运行时的最低频率和电力系统在响应功率扰动时的最低频率,确定电力系统的最大相对能量缺额;

[0094] 惯量补偿设备的惯性参数确定单元500,用于基于电力系统的最大相对能量缺额或最大相对能量余量,确定待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件,根据限定条件确定待设置的惯量补偿设备的惯性参数;

[0095] 其中,惯量补偿设备并联在新能源场站的并网点,并且惯量补偿设备通过释放或存储转动动能来抑制电力系统的频率变化。

[0096] 该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定装置与前述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法具有相同的构思、技术方案和技术效果,这里不再赘述。

[0097] 本发明实施例的一种计算机存储介质,其上存储有计算机程序,计算机程序用于实现前述的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法。

[0098] 具体实施时,本发明另一个实施例的电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法可以包括以下步骤:

[0099] (1)根据系统中电源侧旋转部件的基本参数,确定电力系统的与电源侧对应的惯性参数。

[0100] 具体地,电源侧旋转部件包括:同步发电机组、同步调相机。

[0101] 具体地,电源侧旋转部件的基本参数包括:各同步发电机组的惯性时间常数、各同步发电机组的额定容量、电力系统中同步发电机组的总台数、各同步调相机的惯性时间常数、各同步调相机的额定容量、电力系统中同步调相机的总台数。以上各基本参数的数值可以从电力系统的技术文档中获取或者根据电力系统运行时的动态响应过程确定。

[0102] 具体地,电力系统的与电源侧对应的惯性参数包括:与电源侧对应的惯性时间常数。

[0103] 根据下式确定与电源侧对应的惯性时间常数 $H_{gen}$ :

$$[0104] \quad H_{gen} = \frac{\sum_{i=1}^I H_{gen,i} S_{gen,i} + \sum_{j=1}^J H_{cds,j} S_{cds,j}}{\sum_{i=1}^I S_{gen,i} + \sum_{j=1}^J S_{cds,j}};$$

[0105] 其中, $H_{gen,i}$ 为第*i*台同步发电机组的惯性时间常数;

[0106]  $S_{gen,i}$ 为第*i*台同步发电机组的额定容量;

[0107]  $I$ 为电力系统中同步发电机组的总台数;

[0108]  $H_{cds,j}$ 为第*j*台同步调相机的惯性时间常数;

[0109]  $S_{cds,j}$ 第*j*台同步调相机的额定容量;

[0110]  $J$ 为电力系统中同步调相机的总台数。

[0111] 需要说明的是,这里的同步发电机组包括火电机组、水电机组、燃气机组、热电机组、核电机组、抽水蓄能机组、光热机组、同步风力发电机等电力系统中同步旋转的发电机

组。

[0112] 该基于代数平均得到的电力系统的与电源侧对应的惯性时间常数能够较好地描述将电力系统电源侧的同步发电机组和同步调相机的惯性参数综合后整体上的惯量特性。

[0113] (2) 根据系统中负荷侧旋转部件的基本参数, 确定电力系统的与负荷侧对应的惯性参数。

[0114] 具体地, 负荷侧旋转部件包括: 同步电动机、异步电动机。

[0115] 具体地, 负荷侧旋转部件的基本参数包括: 各同步电动机的惯性时间常数、各同步电动机的额定容量、电力系统中同步电动机的总台数、电力系统负荷侧除同步电动机以外的其他提供惯量的旋转部件的总台数及各旋转部件的惯性时间常数和各旋转部件的额定容量。以上各基本参数的数值可以从电力系统的技术文档中获取或者根据电力系统运行时的动态响应过程确定。

[0116] 具体地, 电力系统的与负荷侧对应的惯性参数包括: 电力系统的与负荷侧对应的惯性时间常数。

[0117] 根据下式确定电力系统的与负荷侧对应的惯性时间常数 $H_{load}$ :

$$[0118] \quad H_{load} = \frac{\sum_{n=1}^N H_{sm,n} S_{sm,n} + \sum_{m=1}^M H_{rot,m} S_{rot,m}}{S_{load}};$$

[0119] 其中,  $H_{sm,n}$  为第 $n$ 台同步电动机的惯性时间常数;

[0120]  $S_{sm,n}$  为第 $n$ 台同步电动机的额定容量;

[0121]  $N$  为电力系统中同步电动机的总台数;

[0122]  $\sum_{m=1}^M H_{rot,m} S_{rot,m}$  表示负荷侧除同步电动机以外的其他提供惯量的旋转部件提供的惯量容量;

[0123]  $H_{rot,m}$  为第 $m$ 台旋转部件的惯性时间常数;

[0124]  $S_{rot,m}$  为第 $m$ 台旋转部件的额定容量;

[0125]  $M$  为电力系统负荷侧除同步电动机以外的其他提供惯量的旋转部件的总台数;

[0126]  $S_{load}$  为电力系统负荷侧所有负荷的额定容量之和。

[0127] 需要说明的是, 在电力系统的负荷侧, 除了同步电动机之外, 其他旋转部件(如异步电动机)也会提供一定量的惯量容量。

[0128] 具体实施时, 根据在电力系统发生故障时各旋转部件的响应过程, 来确定电力系统负荷侧各提供惯量的旋转部件的惯性时间常数。

[0129] 需要说明的是, 电力系统负荷侧既包括可以提供惯量的旋转部件, 也包括不提供惯量的其他静止负荷, 如各种照明灯。

[0130] 以上基于代数平均得到的电力系统的与负荷侧对应的惯性时间常数能够较好地描述将电力系统负荷侧的同步电动机和其他提供惯量的旋转部件的惯性参数综合后整体上的惯量特性。

[0131] (3) 确定电力系统的与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数。

[0132] 具体实施时,电力系统还能够通过虚拟惯性控制提供虚拟惯量。通常,能够提供虚拟惯量的虚拟惯性元件为快速响应的电力电子元件,如风电、光伏、常规直流、柔性直流、储能等子系统内设置的、由快速响应的电力电子元件构成的控制装置。

[0133] 具体地,电力系统的与全部虚拟惯性元件对应的惯性参数包括:电力系统的与全部虚拟惯性元件对应的虚拟惯性时间常数。

[0134] 根据下式确定电力系统的与全部虚拟惯性元件对应的虚拟惯性时间常数 $H_{vi}$ :

$$[0135] \quad H_{vi} = \frac{\sum_{k=1}^K H_{vk} S_{vk}}{\sum_{k=1}^K S_{vk}};$$

[0136] 其中, $S_{vk}$ 为电力系统中第 $k$ 台可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件的额定容量;

[0137]  $H_{vk}$ 为电力系统中第 $k$ 台可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件的虚拟惯性时间常数;

[0138]  $K$ 为电力系统中可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件的总数量。

[0139] 具体地,根据在电力系统发生故障时,各可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件的响应过程,来确定电力系统中各可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件对应的虚拟惯性时间常数。

[0140] (4) 计算电力系统的等效惯性参数。

[0141] 具体地,电力系统的等效惯性参数包括:电力系统的等效惯性时间常数。

[0142] 根据下式确定电力系统的等效惯性时间常数 $H_{sys}$ :

$$[0143] \quad H_{sys} = \frac{H_{gen} \left( \sum_{i=1}^I S_{gen,i} + \sum_{j=1}^J S_{cds,j} \right) + H_{load} S_{load} + H_{vi} \sum_{k=1}^K S_{vk}}{S_{sys}};$$

[0144] 其中, $S_{sys}$ 为电力系统的额定容量;可以从电力系统的技术文档中获取该数值(MW)。

[0145] 应该理解为,这个步骤里的电力系统不包括待设置的惯量补偿设备。

[0146] (5) 确定电力系统响应功率扰动时的系统频率偏差方程。

[0147] 在电力系统的电源侧故障或电力系统的负荷侧故障(如,直流闭锁导致直流送端送不出电能)时,均可能导致电力系统出现功率扰动。

[0148] 根据电网运行规范,在电力系统出现功率扰动的初期,一次调频尚未投入,由系统中的惯性元件(包括:负荷侧旋转部件、电源侧旋转部件、各可提供虚拟惯量的虚拟惯性元件)提供惯量支撑。这里定义一次调频投入之前为系统动态响应的第一阶段。记导致电力系统功率扰动的不平衡功率为 $dP$ ,则根据下式确定电力系统在第一阶段中响应功率扰动时的频率偏差 $df$ :

$$[0149] \quad df = \frac{dP}{D} + \left( df_0 - \frac{dP}{D} \right) e^{-\frac{D}{2H_{sys}} t};$$

[0150] 上式中, $dP$ 是有符号的数值,可能为正数,也可能为负数;在电力系统发生电源侧故障时,电力系统的不平衡功率 $dP$ 为负数;电力系统发生负荷侧故障时,电力系统的不平衡

功率 $dP$ 为正数；

[0151]  $df_0$ 为电力系统频率偏差的初始值(或初始系统频率偏差),在电力系统运行时,电力系统频率偏差的初始值 $df_0$ 可以实时测量得到,也可以按照电力系统稳定运行允许的频率偏差范围确定。

[0152]  $df_0$ 可能为正数,也可能为负数。在电网稳定运行时的频率偏差范围大致为正负0.03Hz时,电力系统稳定运行时的正向频率偏差上限为+0.03Hz,;电力系统稳定运行时的反向频率偏差下限为-0.03Hz。

[0153]  $H_{sys}$ 为电力系统的等效惯性时间常数,由步骤(4)确定；

[0154]  $D$ 为电力系统的等值阻尼系数,用于综合反映同步发电机组和同步调相机的阻尼特性。

[0155]  $df$ 为有符号的数值,可能为正数,也可能为负数；通常, $df$ 的绝对值是 $df_0$ 绝对值的数倍。

[0156] 从上式可知,在系统动态响应的第一阶段,电力系统的频率偏差随时间变化。如图4和图5所示,频率偏差的绝对值随时间呈递增趋势。

[0157] 具体实施时,等值阻尼系数 $D$ 可以通过电力系统在故障响应过程中的频率特性来确定。记 $dP_d$ 为某个情形下电力系统发生功率扰动时的不平衡功率, $df_d$ 为电力系统在功率扰动过后的稳态频率偏差, $K_R$ 为同步发电机组的静态调节系数,则根据下式确定电力系统的等值阻尼系数 $D$ (其恒定为正值)：

$$[0158] \quad D = \frac{dP_d}{df_d} \Big|_{t=\infty} - K_R。$$

[0159] 其中,电力系统发生功率扰动时的不平衡功率 $dP_d$ 与电力系统在功率扰动过后的稳态频率偏差 $df_d$ 的符号一致。

[0160] (6) 确定一次调频投入时,电力系统在最高频率处的频率偏差/最低频率处的频率偏差。

[0161] 以下预测电力系统在响应功率扰动的动态过程中系统频率变化量的最大值。

[0162] 目前,电力系统中通常只有同步发电机组具有一次调频能力。因此,将同步发电机组一次调频的平均动作时间作为一次调频的投入时刻,记为 $t_1$ 。

[0163] 电力系统经历功率扰动时,在一次调频投入之后,电力系统自动控制各惯性元件退出(即电力系统内的各惯性元件不再向电力系统提供惯量支撑),电力系统进入功率扰动响应的第二阶段。

[0164] 在第二阶段,在一次调频投入之后,系统频率逐渐从第一阶段结束时的最高频率向预先设定的频率目标值靠近或从第一阶段结束时的最低频率向预先设定的频率目标值靠近。因此,在 $t_1$ 时刻,系统频率达到功率扰动响应过程中的最高频率/最低频率。

[0165] 进一步地,考虑电力系统因功率扰动导致的最恶劣的工况。在 $df_0$ 为负值时,电力系统进入因电源侧故障(这时,不平衡功率 $dP$ 为负数)导致的频率继续下降的动态响应过程,且在 $t_1$ 时刻,系统频率达到功率扰动响应过程中的最低频率。或在 $df_0$ 为正值时,电力系统进入因负荷侧故障(这时,不平衡功率 $dP$ 为正数)导致的频率继续上升的动态响应过程,且在 $t_1$ 时刻,系统频率达到功率扰动响应过程中的最高频率。

[0166] 根据下式确定电力系统在响应功率扰动的动态过程中的频率偏差最大值 $df_1$ :

$$[0167] \quad df_1 = df \Big|_{t=t_1} = \frac{dP}{D} + \left( df_0 - \frac{dP}{D} \right) e^{-\frac{D}{2H_{\text{sys}}} t_1};$$

[0168] 其中,根据电力系统设计规范,可以确定电力系统安全运行允许的最大功率扰动 $dP$ ;

[0169] 在 $df_0$ 取电力系统稳定运行时的正向频率偏差上限, $dP$ 取负荷侧故障时的最大不平衡功率时,得到电力系统在响应负荷侧故障时的最大正向频率偏差 $df_{1,high}$ ;则最大正向频率偏差与系统频率额定值这二者之和即为电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率。

[0170] 在 $df_0$ 取电力系统稳定运行时的反向频率偏差上限, $dP$ 取电源侧故障时的最大不平衡功率时,得到电力系统在响应电源侧故障时的最大反向频率偏差 $df_{1,low}$ ;则最大反向频率偏差与系统频率额定值这二者之和为电力系统在响应电源侧故障时的最低频率。

[0171] 具体地,如图4中不设置惯量补偿设备时的动态响应曲线所示,在 $t=t_1=7\text{s}$ 时刻,系统频率基本已经达到最低频率49.49Hz,这时,最大反向频率偏差 $df_{1,low}$ 为-0.51Hz(为49.49-50)。

[0172] 如图5中不设置惯量补偿设备时的动态响应曲线所示,在 $t=t_1=7\text{s}$ 时刻,系统频率基本已经达到最高频率50.68Hz,这时,最大正向频率偏差 $df_{1,high}$ 为0.68Hz(为50.68-50)。

[0173] (7) 确定电力系统在响应功率扰动的动态过程中最高频率对应的最大机械转速/最低频率对应的最小机械转速。

[0174] 在一次调频投入的初始时刻(也即电力系统的动态过程中的 $t_1$ 时刻),电力系统频率具有最高频率或最低频率。

[0175] 记电力系统在功率扰动动态响应中的最低频率(为电源侧故障时)对应的机械转速为 $\Omega_{1,low}$ (角速度,rad/s),并根据下式确定 $\Omega_{1,low}$ :

$$[0176] \quad \Omega_{1,low} = \frac{2\pi(f_N + df_{1,low})}{p};$$

[0177] 其中, $f_N$ 为系统的额定频率,如50Hz;

[0178]  $p$ 为同步发电机组的极对数; $p$ 通常为1、2、3;

[0179] 在同步发电机组中,火电机组、燃气机组、热电机组、核电机组、光热机组的极对数为1;而水电机组、抽水蓄能机组、风力发电机组的极对数并不固定,在1-3之间变化。

[0180] 以上与最低频率对应的机械转速 $\Omega_{1,low}$ 即为电力系统在响应电源侧故障时的最低频率对应的最低可能机械转速。

[0181] 记电力系统在功率扰动响应中的最高频率(为负荷侧故障时)对应的机械转速为 $\Omega_{1,high}$ (角速度,rad/s),并根据下式确定 $\Omega_{1,high}$ :

$$[0182] \quad \Omega_{1,high} = \frac{2\pi(f_N + df_{1,high})}{p};$$

[0183] 其中, $f_N$ 为系统的额定频率,如50Hz;



[0184]  $p$ 为同步发电机组的极对数； $p$ 通常为1、2、3。

[0185] 以上与最高频率对应的机械转速 $\Omega_{1,high}$ 即为电力系统在响应负荷侧故障时的最高频率对应的最高可能机械转速。

[0186] (8)计算电力系统的相对能量缺额/相对能量余量

[0187] 为保证电力系统安全运行,在系统频率低于设定的阈值(电力系统安全运行时的最低频率)时,电力系统会自动切除不重要的负荷,也即低频减载;在系统频率高于设定的阈值(电力系统安全运行时的最高频率)时,电力系统会自动切除发电机组,也即高频切机。具体实施时,电力系统安全运行的最低频率为电力系统允许的频率偏差范围的下限;电力系统安全运行的最高频率为电力系统允许的频率偏差范围的上限。

[0188] 应该理解为,电力系统安全运行时的频率偏差阈值(如0.15 Hz)通常大于电力系统稳定运行时的频率偏差阈值(如0.03 Hz)。

[0189] 记电力系统安全运行要求的不发生低频减载的频率偏差阈值 $df_{2,low}$ (如,0.15 Hz)对应的最低机械转速(角速度,rad/s)为 $\Omega_{2,low}$ 。具体地,根据下式确定 $\Omega_{2,low}$ :

$$[0190] \quad \Omega_{2,low} = \frac{2\pi(f_N + df_{2,low})}{p};$$

[0191] 其中, $f_N$ 为系统的额定频率,如50Hz;

[0192]  $p$ 为同步发电机组的极对数;通常 $p$ 为1、2、3。

[0193] 该电力系统安全运行要求的不发生低频减载的频率偏差阈值 $df_{2,low}$ 对应的最低机械转速(角速度,rad/s) $\Omega_{2,low}$ 即为电力系统安全运行时的最低频率对应的最低安全机械转速。

[0194] 记电力系统安全运行要求的不发生高频切机的频率偏差阈值 $df_{2,high}$ (如,0.15 Hz)对应的最高机械转速(角速度,rad/s)为 $\Omega_{2,high}$ 。具体地,根据下式确定 $\Omega_{2,high}$ :

$$[0195] \quad \Omega_{2,high} = \frac{2\pi(f_N + df_{2,high})}{p};$$

[0196] 其中, $f_N$ 为系统的额定频率,如50Hz;

[0197]  $p$ 为同步发电机组的极对数, $p$ 通常为1、2、3。

[0198] 该电力系统安全运行要求的不发生高频切机的频率偏差阈值 $df_{2,high}$ 对应的最高机械转速(角速度,rad/s)为 $\Omega_{2,high}$ 即为电力系统安全运行时的最高频率对应的最高安全机械转速。

[0199] 记电力系统中全部的惯性元件作为一个整体对应的等效转动惯量为 $J_1$ ,则由下式确定电力系统的等效转动惯量 $J_1$ :

$$[0200] \quad J_1 = \frac{H_{sys} S_{sys}}{\Omega_N};$$

[0201] 其中, $\Omega_N$ 为电力系统中同步发电机组的额定机械转速(rad/s)。

[0202] 在电力系统中,各转动设备或旋转部件的转速不尽相同;选择同步发电机组的额

定机械转速 (rad/s)  $\Omega_N$  作为基准转速, 得到的等效转动惯量的物理含义更明确, 也便于与其他转速值进行互换。

[0203] 以下确定电力系统的相对能量缺额/ 相对能量余量。

[0204] 1)、确定电力系统在频率下降场景中的最大相对能量缺额  $dE_k$

[0205] 记电力系统安全运行要求的不发生低频减载的最低频率  $\Omega_{2,low}$  (如, (50-0.15)=49.85Hz) 对应的电力系统的能量缺额为  $dE_{k1}$ 。

[0206] 记电力系统在功率扰动响应中, 在可能下降至的最低频率  $\Omega_{1,low}$  (如图4中的 (50-0.51)=49.49Hz) 时, 累积的能量缺额为  $dE_{k2}$ ;

[0207] 则当前电力系统在响应来自电源侧故障的功率干扰时, 可能产生的最大相对能量缺额  $dE_k$  为:

$$[0208] \quad dE_k = dE_{k2} - dE_{k1} = \frac{1}{2} J_1(\Omega_{2,low})^2 - \frac{1}{2} J_1(\Omega_{1,low})^2 ;$$

[0209] 也即, 由最低安全机械转速、最低可能机械转速、及等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量缺额。

[0210] 相对能量缺额的物理意义是: 如果不额外设置惯量支撑设备作为电源角色参与系统调节, 则系统频率将会下降到不发生低频减载的最低频率  $\Omega_{2,low}$  以下, 并触发低频减载动作。因此, 需要额外配置惯量补偿设备来提供该相对能量缺额。这时, 最大相对能量缺额可以作为确定额外配置的惯量补偿设备的容量/惯性时间常数的依据。

[0211] 2)、确定电力系统在频率上升场景中的最大相对能量余量  $hE_k$

[0212] 记电力系统安全运行要求的不发生高频切机的最高频率  $\Omega_{2,high}$  (如, (50+0.15)=50.15Hz) 对应的电力系统的能量余量为  $hE_{k1}$ 。

[0213] 记电力系统在功率扰动响应中, 在可能上升至的最高频率  $\Omega_{1,high}$  (如图5中 (50+0.68)=50.68 Hz) 时, 累积的能量余量为  $hE_{k2}$ ;

[0214] 则当前电力系统在响应来自负荷侧故障的功率干扰时, 可能产生的最大相对能量余量  $hE_k$  为:

$$[0215] \quad hE_k = hE_{k2} - hE_{k1} = \frac{1}{2} J_1(\Omega_{1,high})^2 - \frac{1}{2} J_1(\Omega_{2,high})^2 ;$$

[0216] 也即, 由最高安全机械转速、最高可能机械转速及等效转动惯量计算得到的转动动能之差为电力系统的最大相对能量余量。

[0217] 相对能量余量的物理意义是: 如果不额外设置惯量支撑设备作为负荷角色参与系统调节, 则系统频率将会上升至不发生高频切机的最高频率  $\Omega_{2,high}$  以上, 并触发高频切机动作。因此, 需要额外配置惯量补偿设备来吸收相对能量余量。这时, 最大相对能量余量可以作为确定额外配置的惯量补偿设备的容量/惯性时间常数的依据。

[0218] (9) 计算待设置的惯量补偿设备的转动惯量及惯性时间常数。

[0219] 为不失一般性, 且简化计算考虑, 在向电力系统中的多个新能源场站的并网点分别配置惯量补偿设备时, 尽量采用各项参数基本相同的惯量补偿设备, 以简化系统配置。也即, 待配置的惯量补偿设备的数量与电力系统内新能源场站的数量相同。

[0220] 这些惯量补偿设备的容量、惯性时间常数、或转动惯量完全相同或部分相同, 以期

尽可能地可相互更换在电网内的设置位置(即并网点)。

[0221] 根据惯量补偿设备吸收相对能量余量时的工作机理(这时,惯量补偿设备的转速从最小机械转速快速上升至最大机械转速),利用下式确定最大相对能量余量对应的惯量补偿设备的转动惯量 $J_{ac}$ :

$$[0222] \quad X * hE_{ac.max} = X * \left( \frac{1}{2} J_{ac} (\Omega_{ac.max})^2 - \frac{1}{2} J_{ac} (\Omega_{ac.min})^2 \right) \geq r * hE_k;$$

[0223] 其中, $X$ 为电力系统中待设置的惯量补偿设备的总台数, $X$ 为大于或等于1的正整数; $\Omega_{ac.max}$ 和 $\Omega_{ac.min}$ 分别为待设置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速;最大机械转速 $\Omega_{ac.max}$ 为 $(1+a)$ 倍额定转速 $\Omega_{ac.N}$ , $a$ 为小于1的正数,如, $a$ 为0.3;最小机械转速 $\Omega_{ac.min}$ 为 $(1-b)$ 倍额定转速 $\Omega_{ac.N}$ , $b$ 为小于1的正数,如, $b$ 为0.3;

[0224]  $J_{ac}$ 为每台惯量补偿设备的转动惯量;

[0225]  $r$ 为裕度系数,为大于或等于1的数值。

[0226] 根据上式确定的待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可存储的转动动能最大值不小于最大相对能量余量。

[0227] 在上式取等号时,转动惯量的数值最小。这时,根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可存储的转动动能最大值等于最大相对能量余量时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量余量值。

[0228] 另一方面,根据惯量补偿设备提供相对能量缺额时的工作机理(这时,惯量补偿设备的转速从最大机械转速快速下降至最小机械转速),利用下式确定最大相对能量缺额对应的惯量补偿设备的转动惯量 $J_{ac}$ :

$$[0229] \quad X * dE_{ac.max} = X * \left( \frac{1}{2} J_{ac} (\Omega_{ac.max})^2 - \frac{1}{2} J_{ac} (\Omega_{ac.min})^2 \right) \geq r * dE_k;$$

[0230] 其中, $X$ 为系统中待设置的惯量补偿设备的总台数, $X$ 为大于或等于1的正整数; $\Omega_{ac.max}$ 和 $\Omega_{ac.min}$ 分别为待设置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速;最大机械转速 $\Omega_{ac.max}$ 为 $(1+a)$ 倍额定转速 $\Omega_{ac.N}$ , $a$ 为小于1的正数,如, $a$ 为0.3;最小机械转速 $\Omega_{ac.min}$ 为 $(1-b)$ 倍额定转速 $\Omega_{ac.N}$ , $b$ 为小于1的正数,如, $b$ 为0.3;

[0231]  $J_{ac}$ 为每台惯量补偿设备的转动惯量;

[0232]  $r$ 为裕度系数,为大于或等于1的数值。

[0233] 根据上式确定的待设置的惯量补偿设备的转动惯量的限定条件为:根据惯量补偿设备的最大机械转速、最小机械转速及转动惯量计算得到的惯量补偿设备可释放的转动动能最大值不小于最大相对能量缺额。

[0234] 在上式取等号时,转动惯量 $J_{ac}$ 的数值最小。这时,根据待配置的惯量补偿设备的最大机械转速和最小机械转速、待配置惯量补偿设备的数量,确定可释放的转动动能最大值等于最大相对能量缺额时的转动惯量为名义转动惯量的最小能量缺额值。则确定名义转动惯量的最小能量余量值和名义转动惯量的最小能量缺额值中的较大值为电力系统内待配置的惯量补偿设备的的名义转动惯量。

[0235] 综上,取惯量补偿设备提供相对能量缺额或吸收相对能量余量时分别对应的转动

惯量中的较大值作为惯量补偿设备的名义转动惯量可以全面覆盖惯量补偿设备提供相对能量缺额/吸收相对能量余量这两种工作场景。

[0236] 惯量补偿设备设置到电力系统中后,在电力系统因电源侧故障发生功率扰动时,惯量补偿设备受控于控制元件,在一次调频投入之前动作;电力系统通过将惯量补偿设备释放的转动动能转换为电能注入到电网中,向提供电网系统所需的能量缺额,通过电力系统提供额外的惯量支撑,来避免电力系统的频率下降过多。也即,惯量补偿设备的作用就是通过释放转动动能,补足之前电力系统中因惯量支撑不足可能产生的能量缺额。

[0237] 惯量补偿设备设置到电力系统中后,在电力系统因负荷侧故障发生功率扰动时,惯量补偿设备受控于控制元件,在一次调频投入之前动作;电力系统通过从电网中吸收能量,并将其转换为存储在惯量补偿设备中的转动动能,来吸收电网系统存在的能量余量,通过向电力系统提供额外的惯量支撑,来避免电力系统的频率上升过多。也即,惯量补偿设备的作用就是通过存储转动动能,吸收之前电力系统中因惯量支撑不足可能产生的能量余量。

[0238] 以上确定的惯量补偿设备的名义转动惯量 $J_{ac}$ 能够满足电力系统的频率调节需求和惯量支撑需求。该名义转动惯量 $J_{ac}$ 可以用于指导设计出合理经济的惯量补偿设备。

[0239] 具体地,与电力系统中通过虚拟惯性控制提供虚拟惯量的快速响应电力电子元件不同,该惯量补偿设备包括定子绕组和转子绕组。具体地,该惯量补偿设备的结构与同步调相机相似,但该惯量补偿设备的转子绕组作为存储机械能和释放机械能的部件,具有更大的转动惯量。其中,转子绕组的转动惯量大部分来自转轴,小部分来自转轴上设置的绕组。

[0240] 具体实施时,为实现与电力系统更好地协调工作,可以通过修改转轴直径、转轴长度等结构参数及转轴结构、转轴上设置的绕组的结构等技术手段来优化该惯量补偿设备的转动惯量的数值。

[0241] 应该理解为,作为有功功率和无功功率分别独立可控的设备,该惯量补偿设备的额定容量 $S_{ac}$ 通常为MVA量级。

[0242] 进一步,根据下式,确定惯量补偿设备的标么值下惯性时间常数 $H_{ac}$ :

$$[0243] \quad H_{ac} = \frac{J_{ac} \Omega_{ac.N}}{S_{ac}};$$

[0244] 其中, $S_{ac}$ 为惯量补偿设备的额定容量;

[0245]  $\Omega_{ac.N}$ 为惯量补偿设备的额定转速。

[0246] 优选地,优选地,该惯量补偿设备的额定容量 $S_{ac}$ 通常为待接入的并网点处新能源场站的额定容量的10%左右。

[0247] 上式中,根据待配置惯量补偿设备的名义转动惯量、待配置惯量补偿设备的新能源场站的额定容量和待配置惯量补偿设备的额定转速,确定待配置的惯量补偿设备的标么值下惯性时间常数。

[0248] 具体实施时,各惯量补偿设备并联地接入到新能源场站的并网点,各惯量补偿设备的额定容量与标么值下惯性时间常数的乘积的累加和为待向电网内补偿的惯量容量。

[0249] 应该理解为,电力系统中设置了惯量补偿设备后,增加设置的惯量补偿设备向电力系统提供惯量支撑,这些惯量补偿设备的额定容量会计入到电力系统的额定容量。

[0250] 该电力系统中惯量补偿设备的惯性参数确定方法确定的名义转动惯量和标么值下惯性时间常数,用于设计参数适当的惯量补偿设备。这些惯量补偿设备设置到电力系统后,对电力系统的频率产生正向调节作用,避免电力系统因频率突升或突降导致减载或切机保护动作,避免 新能源场站脱网或用电负荷脱网,可有力地提升高新能源渗透率电网的运行稳定性和经济性。

[0251] 如图3所示,该特高压直流送端近区电网由5机14节点构成,其中, 5机也即5个发电单元对应于两台同步发电机和三个新能源场站, 14节点对应于一个特高压直流及其配套的同步调相机以及10个负荷点。因此,该特高压直流送端近区电网内,新能源汇集,新能源占比高,新能源集群化明显。在系统频率变化过大时,出现过并网新能源机组的频率变化保护动作,造成新能源机组脱网,进一步恶化系统的频率稳定状态的情形。

[0252] 针对图3所示的特高压直流送端近区电网,通过仿真确定发生电源侧故障时,向其配置具有不同数值惯性时间常数的惯量补偿设备时的多组系统频率响应过程。

[0253] 具体地,图4示出了分别配置偏小的惯性时间常数、配置适当的惯性时间常数及配置过大的惯性时间常数,该近区电网在经历频率下降时电力系统的频率响应曲线。

[0254] 从图4可知,偏大的惯性时间常数及偏小的惯性时间常数,都不能有效地减少系统频率的下降幅度(即频率偏差)。只有适当的惯性时间常数才可以避免系统频率下降过多,进而避免并网的新能源场站的频率变化保护因低频而动作,有利于维持系统的频率稳定状态。

[0255] 作为对比,针对图3所示的特高压直流送端近区电网,通过仿真确定发生负荷侧故障时,向其配置具有不同数值惯性时间常数的惯量补偿设备时的多组系统频率响应过程。

[0256] 具体地,图5示出了分别配置偏小的惯性时间常数、配置适当的惯性时间常数及配置过大的惯性时间常数,该近区电网在经历频率上升时电力系统的频率响应曲线。

[0257] 从图5可知,偏大的惯性时间常数及偏小的惯性时间常数,都不能有效地减少系统频率的上升幅度(即频率偏差)。只有适当的惯性时间常数才可以避免系统频率变化过大,进而避免系统高频切机保护因频率过高而动作(如,将并网的新能源场站脱网)或并网的新能源场站的频率变化保护因频率过高而动作造成新能源脱网,有利于维持系统的频率稳定状态。

[0258] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0259] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0260] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特

定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0261] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0262] 以上已经通过参考少量实施方式描述了本发明。然而,本领域技术人员所公知的,正如附带的专利权利要求所限定的,除了本发明以上公开的 其他的实施例等地落在本发明的范围内。

[0263] 通常地,在权利要求中使用的所有术语都根据他们在技术领域的通常含义被解释,除非在其中被另外明确地定义。所有的参考“一个//该[装置、组件等]”都被开放地解释为装置、组件等中的至少一个实例,除非另外明确地说明。这里公开的任何方法的步骤都没必要以公开的准确的顺序运行,除非明确地说明。

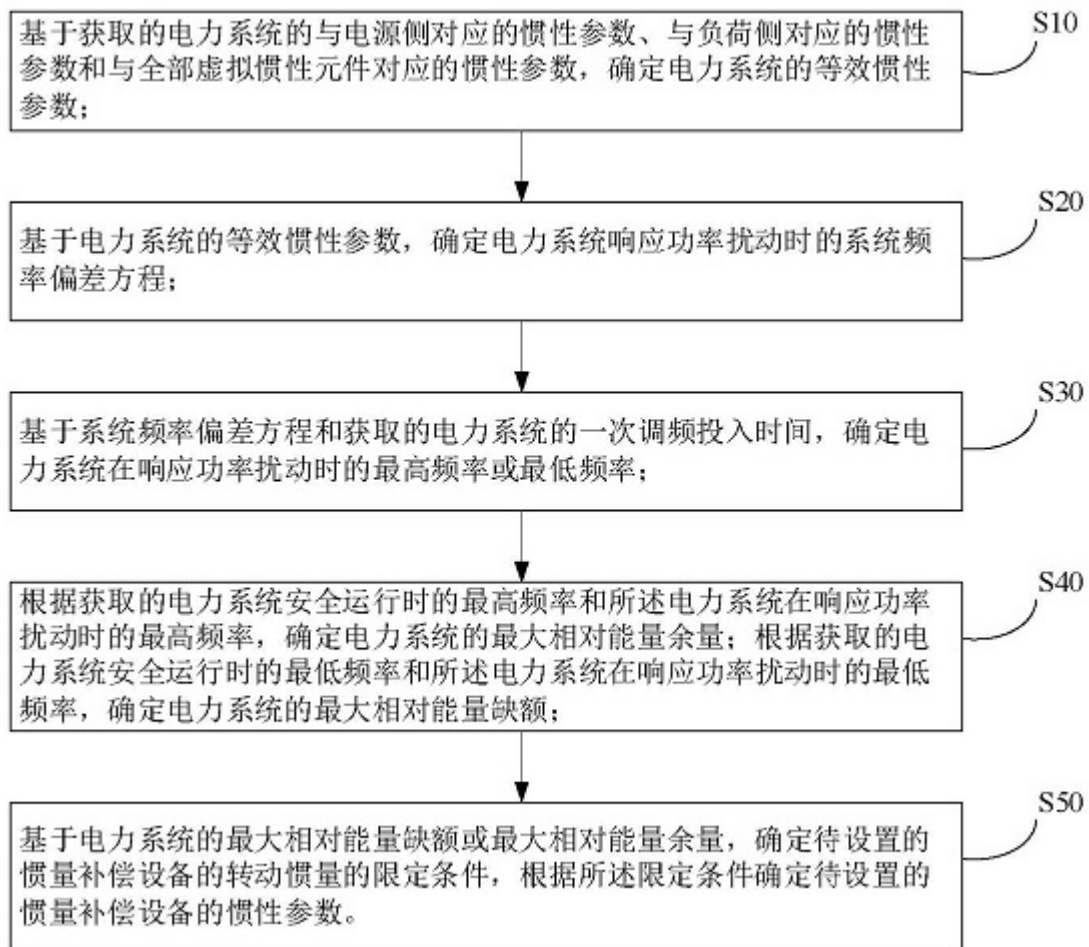


图1

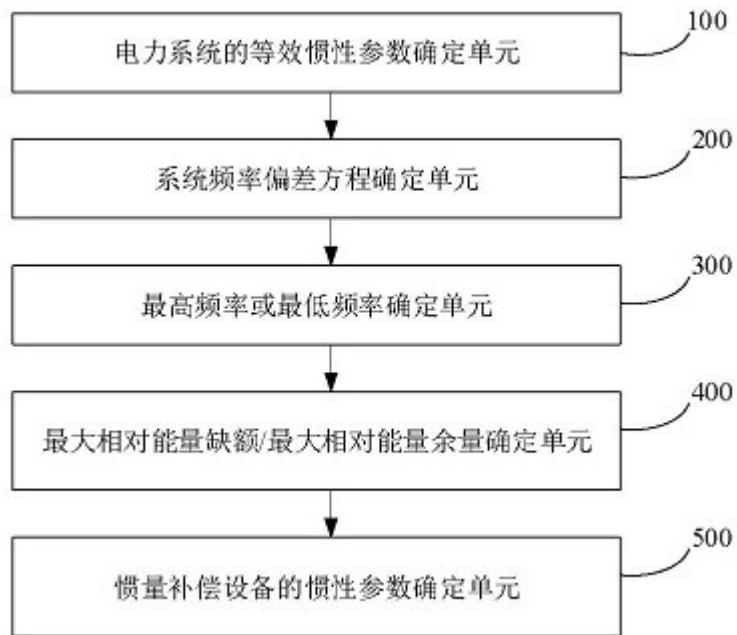


图2

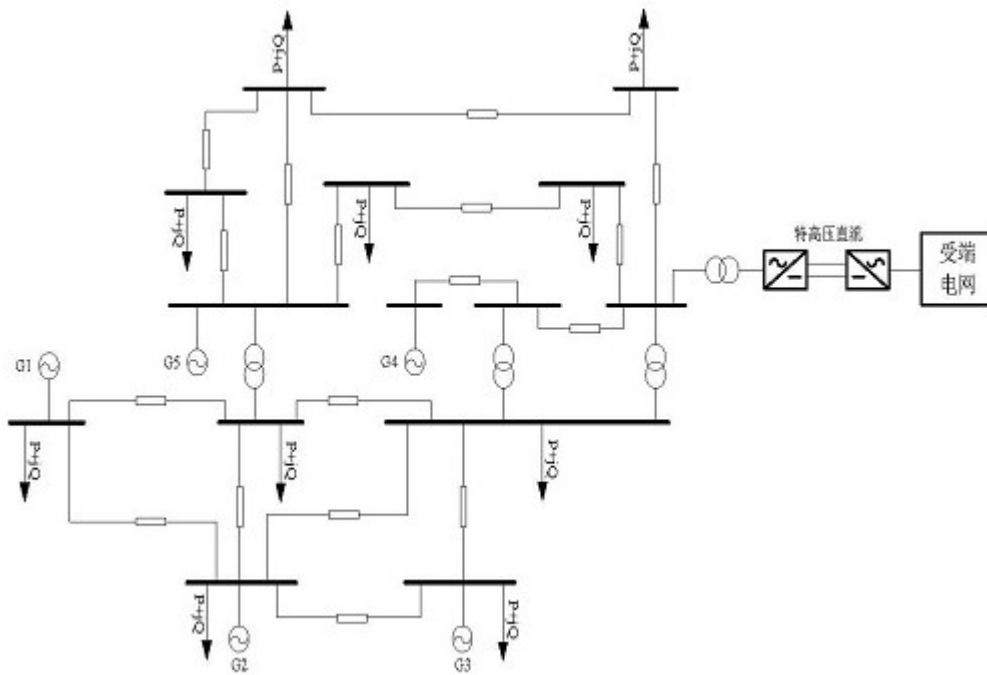


图3



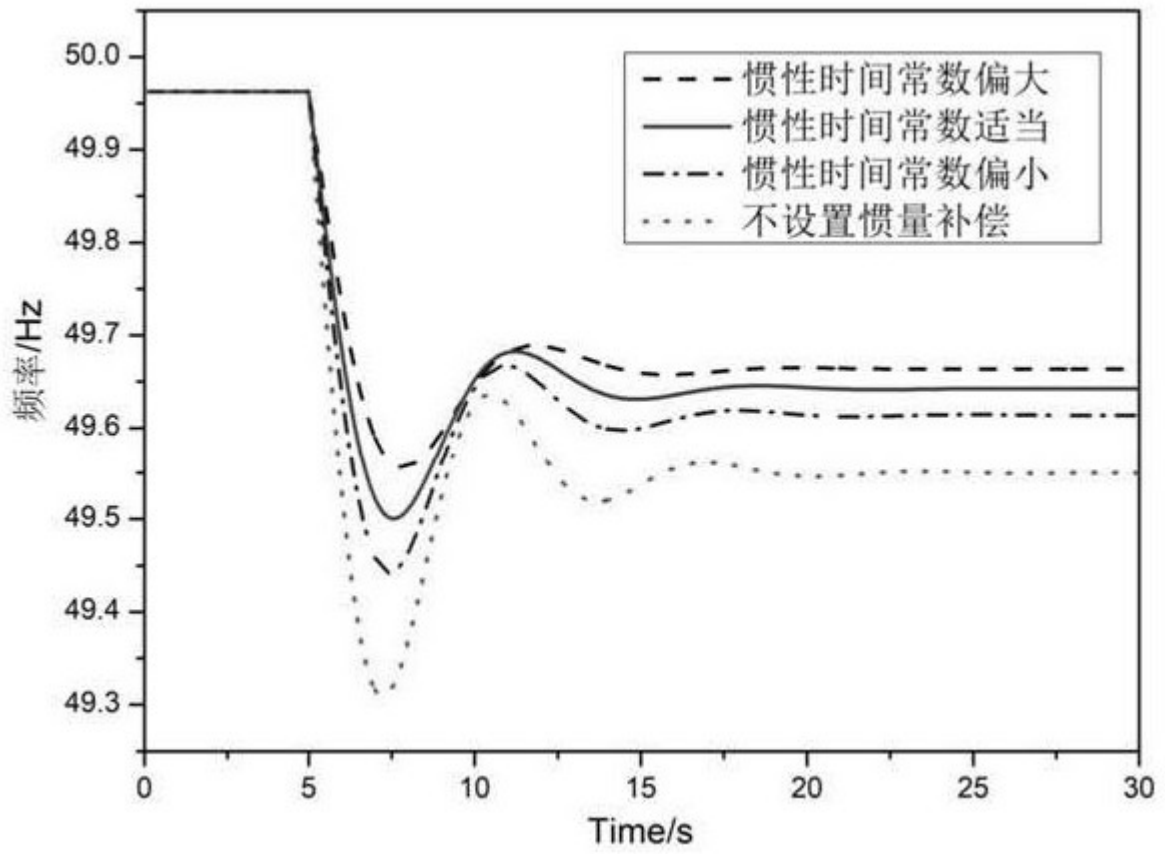


图4

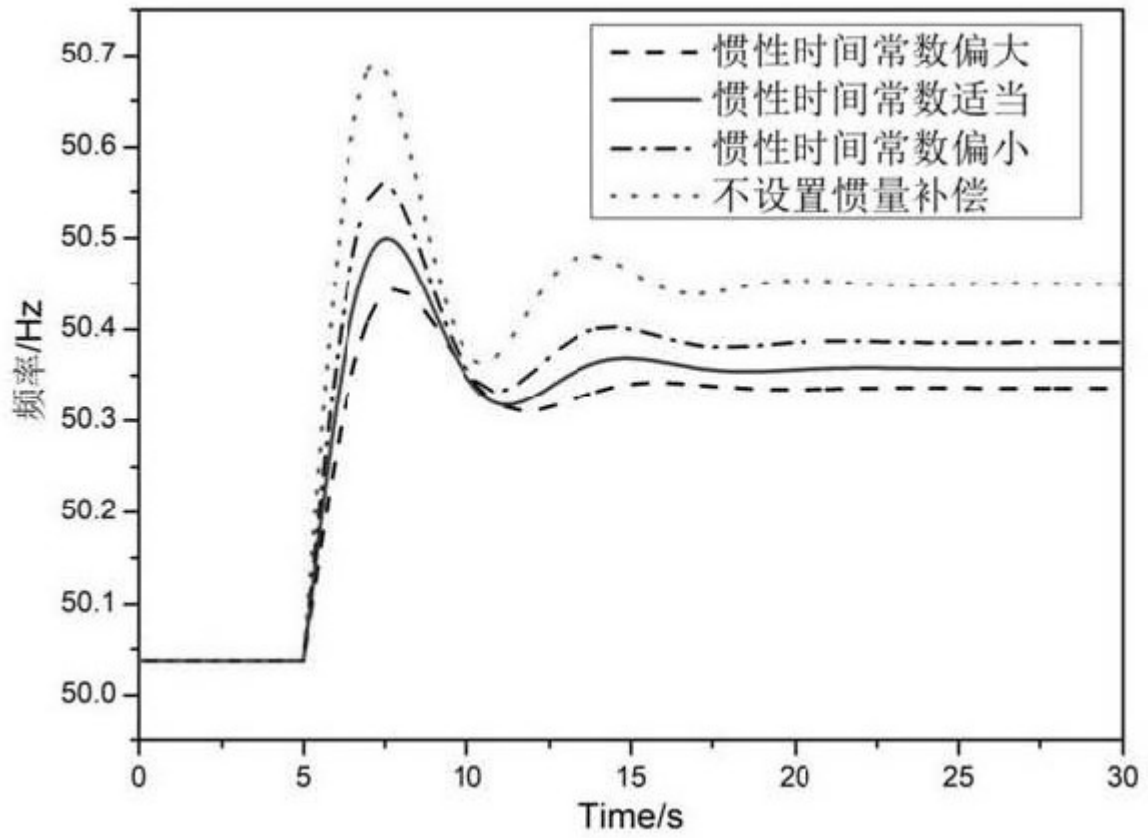


图5