



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113381432 B

(45) 授权公告日 2022. 07. 08

(21) 申请号 202110609368.8
 (22) 申请日 2021.06.01
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 113381432 A
 (43) 申请公布日 2021.09.10
 (73) 专利权人 国网山东省电力公司电力科学研究院
 地址 250003 山东省济南市市中区望岳路
 2000号
 专利权人 国家电网有限公司
 (72) 发明人 王继豪 曹志伟 王安东 孙福春
 孙善华 商攀峰
 (74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221
 专利代理师 邓建国

(56) 对比文件
 US 2006282239 A1,2006.12.14
 CN 109617107 A,2019.04.12
 WO 2014173131 A1,2014.10.30
 CN 108599220 A,2018.09.28
 T. Cui.Voltage Stability of Received Power Grids with UHVDC Systems Under Different Initial States of Synchronous Condensers.《2020 International Conference on Wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG)》.2020,
 徐春婷.同步调相机对直流输电系统电压稳定性的影响研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士)工程科技II辑》.2021, (续)
 审查员 周玥

(51) Int. Cl.
 H02J 3/36 (2006.01)
 H02J 3/00 (2006.01)
 G06F 30/20 (2020.01)

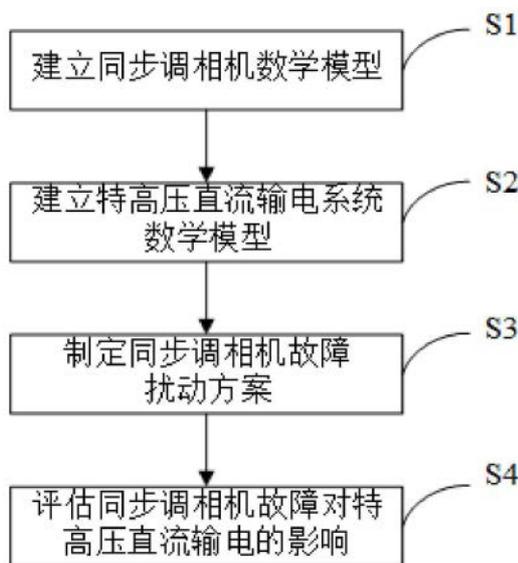
权利要求书5页 说明书16页 附图10页

(54) 发明名称
 一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法

(57) 摘要

本发明公布了一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,包括以下步骤:建立同步调相机数学模型;建立特高压直流输电系统数学模型;制定同步调相机故障扰动方案;评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响。本发明的评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,能够灵活设置同步调相机故障类型、同步调相机负荷及特高压直流输电负荷,可以准确评估同步调相机故障导致直流闭锁的概率;该方法简单有效,评估结果可为制定反事故措施提供理论依据,指导同步调相机的运维检修,可减少直流闭锁故障发生的概率,进而减少负荷损失,具有很大的经济效益和工程实用价

值。



CN 113381432 B

[接上页]

(56) 对比文件

王庆等.同步调相机对LCC-HVDC换相失败抵御能力的影响研究.《电工电能新技术》.2018,(第05期),

乔丽等.同步调相机对分层接入特高压直流输电系统的暂态过电压抑制作用研究.《中国电力》.2020,(第03期),

王龙飞等.抑制直流连续换相失败的调相机暂态强励控制策略.《浙江电力》.2020,(第08期),

张开宇等.加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析.《电力系统保护与控制》.2017,(第22期),

1. 一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,包括以下步骤:

建立同步调相机数学模型;

建立特高压直流输电系统数学模型;

制定同步调相机故障扰动方案,包括:设置同步调相机转子接地短路故障;设置同步调相机出口短路故障;设置同步调相机因辅助系统故障导致跳机;

评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响,包括:

评估同步调相机在不同程度、随机性发生时刻、不同运行状态下的转子接地短路故障导致换相失败的概率;

评估同步调相机在不同程度、随机性发生时刻、不同运行状态下多种出口短路故障导致换相失败的概率;

评估同步调相机因升压变高压侧与母线之间的断路器故障导致换相失败的概率。

2. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,所述建立同步调相机数学模型的步骤,具体包括:

建立考虑饱和效应的同步调相机数学模型,该模型采用同步电机park方程;

建立同步调相机励磁控制系统数学模型,该模型采用IEEE的标准ST5B模型。

3. 根据权利要求2所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,

当不考虑同步调相机饱和效应时,转子绕组的电压方程如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} T''_{d0} \frac{de''_q}{dt} = e'_q - e''_q - (x'_d - x''_d) i_d \\ T'_{d0} \frac{de'_q}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - e'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} (e'_q - e''_q) \\ T'_{q0} \frac{de''_d}{dt} = e'_d - e''_d - (x'_q - x''_q) i_d \\ T'_{q0} \frac{de'_d}{dt} = -e'_d - \frac{x_q - x'_q}{x'_q - x''_q} (e'_d - e''_d) \end{array} \right.$$

其中, e'_q 表示交轴暂态电势, e''_q 表示交轴次暂态电势, e'_d 表示直轴暂态电势, e''_d 表示直轴次暂态电势, u_f 表示励磁电压, x_d 表示纵轴同步电抗, x'_d 表示纵轴瞬态电抗, x''_d 表示纵轴超瞬态电抗, x_q 表示横轴同步电抗, x'_q 表示横轴瞬态电抗, x''_q 表示横轴超瞬态电抗, x_{af} 表示励磁绕组漏电抗, r_f 表示励磁绕组电阻, i_d 表示纵轴电流分量, i_q 表示横轴电流分量, T'_{d0} 表示纵轴开路暂态时间参数, T''_{d0} 表示纵轴开路超瞬态时间参数, T'_{q0} 表示横轴开路瞬态时间参数, T''_{q0} 表示横轴开路超瞬态时间常数;

引入饱和修正系数修正瞬态电势,得到考虑饱和效应的转子绕组电压方程,如下所示:

$$\begin{cases} T_{d0}'' \frac{de_q''}{dt} = -e_q'' - (x_d' - x_d'')i_d + e_q' + T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} \\ T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d')i_d + (K_G - 1)e_q'] \\ T_{q0}'' \frac{de_d''}{dt} = -e_d'' + (x_q' - x_q'')i_q + e_d' + T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} \\ T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} = -e_d' + (x_q - x_q')i_q \end{cases}$$

其中, K_G 表示饱和系数, 计算公式如下:

$$K_G = 1 + \frac{b}{a} e_q^{(n-1)}$$

其中, e_q' 表示交轴暂态电势, $n-1$ 表示指数, a, b, n 表示饱和参数。

4. 根据权利要求3所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法, 其特征在于,

发电机饱和的模拟过程如下:

同步电机励磁电流与空载电势之间由于铁芯饱和而呈现非线性关系, 这种非线性关系可用电机空载饱和特性曲线来表示;

不饱和时, 空载电势 $e_q(0)$ 等于不饱和的电枢反应电抗 x_{ad} 与励磁电流 i_f 的乘积, 即:

$$e_q(0) = x_{ad} i_f$$

饱和后,

$$e_q = e_q(0) \cdot \frac{i_f(0)}{i_f}$$

其中, $i_f(0)$ 表示产生 e_q 所需的励磁电流;

定义上式中 $i_f/i_f(0) = K_G$ 为饱和系数, 则有:

$$e_q = \frac{1}{K_G} e_q(0)$$

用下式对 e_q' 进行修正:

$$e_q' = \frac{1}{K_G} e_q'(0)$$

其中, e_q' 和 $e_q'(0)$ 分别为暂态电势的饱和值和非饱和值;

以饱和值的 e_q' 代入暂态电势变化的微分方程, 可得:

$$\begin{aligned}
T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - K_G e_q' - (x_d - x_d') i_d \\
&= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + (K_G - 1) e_q'] \\
&= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + \Delta E_f]
\end{aligned}$$

已知不饱和曲线 $i_f(0)$ 与 e_q' 的关系是线性的,如下式:

$$i_f(0) = a e_q'$$

饱和曲线 i_f 与 e_q' 的关系是非线性的,可近似表示为:

$$i_f = a e_q' + b e_q'^n$$

其中,a、b、n的参数值可根据实际饱和曲线用拟合的方法求出;

根据饱和系数 K_G 的定义,可得:

$$K_G = \frac{i_f}{i_f(0)} = 1 + \frac{b}{a} e_q'^{(n-1)}$$

其中, e_q' 表示交轴暂态电势,n-1表示指数,a、b、n表示饱和参数。

5. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,所述建立特高压直流输电系统数学模型,具体包括:

建立交流电网等效电源数学模型、换流变数学模型、换流阀数学模型、直流输电线路数学模型、平波电抗器数学模型、交流滤波器场数学模型、直流滤波器数学模型、特高压直流控制系统数学模型、包含同步调相机的特高压直流输电系统模型。

6. 根据权利要求5所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,

建立交流电网等效电源数学模型,该模型采用电压源和阻抗串联进行等效;

交流系统强度与戴维南等效阻抗 Z_{ac} 相关联,用短路比SCR来表示,SCR被定义为交流系统短路容量SCL与直流系统额定容量 P_d 的比值,SCL的单位为MVA;

$$\begin{aligned}
SCL &= \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}} \\
SCR &= \frac{SCL}{P_d} = \frac{E_{ac}^2}{P_d \cdot Z_{ac}}
\end{aligned}$$

交流系统短路容量SCL通过电力系统仿真软件计算得到,直流系统额定容量 P_d 是已知的,也即SCR是已知的,母线电压 E_{ac} 是已知的,取额定电压,交流电网戴维南等效阻抗 Z_{ac} 通过计算获得,即:

$$Z_{ac} = \frac{E_{ac}^2}{SCR \cdot P_d}$$

至此,建立了特高压直流输电系统送端和受端交流电网的等效数学模型。

7. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其

特征在于，

所述设置同步调相机转子接地短路故障，具体包括：

令励磁电压突然骤降，模拟转子滑环位置发生转子接地故障，经过一段时间后跳机；

改变接地电阻的大小，模拟同步调相机转子不同程度的接地故障；

改变转子接地时刻，模拟同步调相机转子接地故障发生时刻的随机性。

8. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法，其特征在于，

所述设置同步调相机出口短路故障，具体包括：

设置同步调相机与升压变之间发生短路故障，令同步调相机与升压变之间的母线经电阻接地；改变接地电阻的大小，模拟不同程度的接地故障；改变接地故障发生时刻，模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

9. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法，其特征在于，

所述设置同步调相机出口短路故障，具体包括：

设置升压变高压侧发生短路故障，令升压变高压侧母线经电阻接地；改变接地电阻的大小，模拟不同程度的接地故障；改变接地故障发生时刻，模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

10. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法，其特征在于，

所述评估同步调相机在不同程度、随机性发生时刻、不同运行状态下的转子接地短路故障导致换相失败的概率，具体包括：

步骤S410、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时，直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时，设置同步调相机发生转子接地故障；

步骤S411、改变接地电阻的大小，模拟调相机转子不同程度的接地故障，计算直流换相失败的概率；

步骤S412、改变转子接地时刻，模拟调相机转子接地故障发生时刻的随机性，计算直流换相失败的概率；

步骤S413、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar，重复步骤S411~S412，分析调相机不同运行状态下转子接地故障导致换相失败的概率。

11. 根据权利要求1所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法，其特征在于，

所述评估同步调相机在不同程度、随机性发生时刻、不同运行状态下多种出口短路故障导致换相失败的概率，具体包括：

步骤S420、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时，直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时，设置调相机出口短路故障；

步骤S421、设置同步调相机与升压变之间的母线发生单相接地短路故障；

步骤S422、改变接地电阻的大小，模拟不同程度的接地故障，计算直流换相失败的概率；

步骤S423、改变接地故障发生时刻,模拟母线接地故障发生时刻的随机性,计算直流换相失败的概率;

步骤S424、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,重复步骤S422~S423,分析调相机不同运行状态下母线短路故障导致换相失败的概率;

步骤S425、令母线发生三相短路、两相短路故障、两相短路接地故障,重复步骤S422~S424;

步骤S426、令升压变高压侧母线发生短路故障,重复步骤S421~S425。

12. 根据权利要求11所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,

所述评估同步调相机因升压变高压侧与母线之间的断路器故障导致换相失败的概率,具体包括:

特高压直流输电系统为单/双极性运行,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,断开调相机升压变高压侧与500kV母线之间的断路器,计算直流换相失败的概率。

13. 根据权利要求1至12任一项所述的一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,其特征在于,

所述换相失败的判断方法是当熄弧角 γ 小于给定最小熄弧角 γ_{\min} 时,即判断发生换相失败;

考虑换流变压器的变比后,可得系统对称时逆变器熄弧角为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta\right)$$

当逆变侧交流系统发生不对称故障并使换相线电压过零点前移角度 φ 时,逆变器熄弧角为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta\right) - \varphi$$

其中,k表示换流变变比,U表示交流母线电压有效值, I_d 表示直流电流,L表示换相电抗, β 表示触发超前角。

14. 一种计算机设备,包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现权利要求1至13中任一项所述的方法的步骤。

一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电网分析计算领域,尤其是一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法。

背景技术

[0002] 我国能源资源与负荷呈逆向分布,通过大容量、远距离特高压直流输电系统将西北部的新能源送往东部负荷中心,是促进新能源消纳和实现资源配置的有效手段。但是特高压直流输电系统接入电网后,电网“强直弱交”问题突出。根据特高压直流设计原则,直流系统在大规模输送有功功率的同时,本身并不向系统提供无功,需要从电网吸收接近输送功率40%-50%的无功功率。在电网发生故障的动态过程中吸收的无功功率还将大幅增加,甚至导致局部动态无功补偿不足,电网失稳风险增大,电压稳定问题突出。针对我国特高压直流输电动态无功储备不足和电压支撑能力不够的突出问题,客观要求直流大规模有功输送,必须匹配大量动态无功补偿装置,即“大直流输电、强无功支撑”。相对于SVC和STATCOM,同步调相机高、低电压穿越能力强,短时过载能力大,其调节能力基本不受系统电压影响,故障情况下具有强大的瞬时无功支撑和短时过载能力,在动态无功补偿方面具有独特的优势。同时,作为空载运行的大型同步电动机,同步调相机还可以为薄弱的特高压直流送端系统提供一定的短路容量和转动惯量支撑。

[0003] 同步调相机的安全稳定运行是充分发挥其无功紧急支撑能力的前提。相对于变压器、断路器、输电线路等静止设备,同步调相机属于旋转设备,涉及油系统、冷却系统、励磁系统、SFC系统等多个系统,运维过程复杂且工作量大。目前,国内同步调相机投运三年左右,由于前期安装调试遗留缺陷或者设备质量问题,已经暴露出多个缺陷或隐患,甚至发生过同步调相机跳机事件,对换流站造成了一定的不利影响,引起来运维人员的关注。由于同步调相机直接与换流站内500kV交流母线相连,同步调相机与直流输电系统耦合紧密。同步调相机发生故障将导致交流母线电压跌落及升高,而特高压直流输电输送容量大,一旦同步调相机故障造成直流闭锁,将造成极大的经济损失,对换流站造成不利影响。扰动过程中的过电压甚至可能损坏其余的电力设备。

[0004] 为此,如何提供一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,以便提前制定反事故措施,降低或消除负面影响,是目前亟待解决的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,为制定反事故措施提供依据,有效降低直流闭锁发生概率,减少负荷损失,具有很大的经济效益。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用下述技术方案:

[0007] 根据本发明的第一方面,提供了一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法。

- [0008] 在一个实施例中,上述方法包括以下步骤:
- [0009] 建立同步调相机数学模型;
- [0010] 建立特高压直流输电系统数学模型;
- [0011] 制定同步调相机故障扰动方案;
- [0012] 评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响。
- [0013] 可选地,所述建立同步调相机数学模型的步骤,具体包括:
- [0014] 建立考虑饱和效应的同步调相机数学模型,该模型采用同步电机park方程;
- [0015] 建立同步调相机励磁控制系统数学模型,该模型采用IEEE的标准ST5B模型。
- [0016] 可选地,当不考虑同步调相机饱和效应时,转子绕组的电压方程如下所示:

$$[0017] \quad \begin{cases} T_{d0}'' \frac{de_q''}{dt} = e_q' - e_q'' - (x_d' - x_d'') i_d \\ T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - e_q' - \frac{x_d - x_d'}{x_d' - x_d''} (e_q' - e_q'') \\ T_{q0}'' \frac{de_d''}{dt} = e_d' - e_d'' - (x_q' - x_q'') i_q \\ T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} = -e_d' - \frac{x_q - x_q'}{x_q' - x_q''} (e_d' - e_d'') \end{cases}$$

[0018] 其中, e_q' 表示交轴暂态电势, e_q'' 表示交轴次暂态电势, e_d' 表示直轴暂态电势, e_d'' 表示直轴次暂态电势, u_f 表示励磁电压, x_d 表示纵轴同步电抗, x_d' 表示纵轴瞬态电抗, x_d'' 表示纵轴超瞬态电抗, x_q 表示横轴同步电抗, x_q' 表示横轴瞬态电抗, x_q'' 表示横轴超瞬态电抗, x_{af} 表示励磁绕组漏电抗, r_f 表示励磁绕组电阻, i_d 表示纵轴电流分量, i_q 表示横轴电流分量, T_{d0}' 表示纵轴开路暂态时间参数, T_{d0}'' 表示纵轴开路超瞬态时间参数, T_{q0}' 表示横轴开路瞬态时间参数, T_{q0}'' 表示横轴开路超瞬态时间常数;

[0019] 引入饱和修正系数修正瞬态电势,得到考虑饱和效应的转子绕组电压方程,如下所示:

$$[0020] \quad \begin{cases} T_{d0}'' \frac{de_q''}{dt} = -e_q'' - (x_d' - x_d'') i_d + e_q' + T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} \\ T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + (K_G - 1) e_q'] \\ T_{q0}'' \frac{de_d''}{dt} = -e_d'' + (x_q' - x_q'') i_q + e_d' + T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} \\ T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} = -e_d' + (x_q - x_q'') i_q \end{cases}$$

[0021] 其中, K_G 表示饱和系数,计算公式如下:

$$[0022] \quad K_G = 1 + \frac{b}{a} e_q^{(n-1)}$$

[0023] 其中, e_q' 表示交轴暂态电势, $n-1$ 表示指数, a 、 b 、 n 表示饱和参数。

[0024] 可选地, 发电机饱和的模拟过程如下:

[0025] 同步电机励磁电流与空载电势之间由于铁芯饱和而呈现非线性关系, 这种非线性关系可用电机空载饱和特性曲线来表示;

[0026] 不饱和时, 空载电势 $e_q(0)$ 等于不饱和的电枢反应电抗 x_{ad} 与励磁电流 i_f 的乘积, 即:

$$[0027] \quad e_q(0) = x_{ad} i_f$$

[0028] 饱和后,

$$[0029] \quad e_q = e_q(0) \cdot \frac{i_f(0)}{i_f}$$

[0030] 其中, $i_f(0)$ 表示产生 e_q 所需的励磁电流;

[0031] 定义上式中 $i_f/i_f(0) = K_G$ 为饱和系数, 则有:

$$[0032] \quad e_q = \frac{1}{K_G} e_q(0)$$

[0033] 用下式对 e_q' 进行修正:

$$[0034] \quad e_q' = \frac{1}{K_G} e_q'(0)$$

[0035] 其中, e_q' 和 $e_q'(0)$ 分别为暂态电势的饱和值和非饱和值。

[0036] 以饱和值的 e_q' 代入暂态电势变化的微分方程, 可得:

$$[0037] \quad \begin{aligned} T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - K_G e_q' - (x_d - x_d') i_d \\ &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + (K_G - 1) e_q'] \\ &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + \Delta E_I] \end{aligned}$$

[0038] 已知不饱和曲线 $i_f(0)$ 与 e_q' 的关系是线性的, 如下式:

$$[0039] \quad i_f(0) = a e_q'$$

[0040] 饱和曲线 i_f 与 e_q' 的关系是非线性的, 可近似表示为:

$$[0041] \quad i_f = a e_q' + b e_q'^n$$

[0042] 其中, a 、 b 、 n 的参数值可根据实际饱和曲线用拟合的方法求出;

[0043] 根据饱和系数 K_G 的定义, 可得:

$$[0044] \quad K_G = \frac{i_f}{i_f(0)} = 1 + \frac{b}{a} e_q'^{(n-1)}$$

[0045] 其中, e_q' 表示交轴暂态电势, $n-1$ 表示指数, a 、 b 、 n 表示饱和参数。

[0046] 可选地, 电压闭环调节方式遵循的调节规律为IEEE标准PID模式。

[0047] 可选地,所述建立特高压直流输电系统数学模型,具体包括:

[0048] 建立交流电网等效电源数学模型、换流变数学模型、换流阀数学模型、直流输电线路数学模型、平波电抗器数学模型、交流滤波器场数学模型、直流滤波器数学模型、特高压直流控制系统数学模型、包含同步调相机的特高压直流输电系统模型。

[0049] 可选地,建立交流电网等效电源数学模型,该模型采用电压源和阻抗串联进行等效;

[0050] 交流系统强度与戴维南等效阻抗 Z_{ac} 相关联,用短路比SCR来表示,SCR被定义为交流系统短路容量SCL与直流功率(即直流系统额定容量) P_d 的比值,SCL的单位为MVA;

$$[0051] \quad SLC = \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}}$$

$$[0052] \quad SCR = \frac{SCL}{P_d} = \frac{E_{ac}^2}{P_d \cdot Z_{ac}}$$

[0053] 交流系统短路容量SCL通过电力系统仿真软件计算得到,直流系统额定容量 P_d 是已知的,也即SCR是已知的,母线电压 E_{ac} 是已知的,取额定电压,交流电网戴维南等效阻抗 Z_{ac} 通过计算获得,即:

$$[0054] \quad Z_{ac} = \frac{E_{ac}^2}{SCR \cdot P_d}$$

[0055] 至此,建立了特高压直流输电系统送端和受端交流电网的等效数学模型。

[0056] 可选地,所述制定同步调相机故障扰动方案,具体包括:

[0057] 设置同步调相机转子接地短路故障;

[0058] 设置同步调相机出口短路故障;

[0059] 设置同步调相机因辅助系统故障导致跳机。

[0060] 可选地,所述设置同步调相机转子接地短路故障,具体包括:

[0061] 令励磁电压突然骤降,模拟转子滑环位置发生转子接地故障,经过一段时间后跳机;

[0062] 改变接地电阻的大小,模拟同步调相机转子不同程度的接地故障;

[0063] 改变转子接地时刻,模拟同步调相机转子接地故障发生时刻的随机性。

[0064] 可选地,所述设置同步调相机出口短路故障,具体包括:

[0065] 设置同步调相机与升压变之间发生短路故障,令同步调相机与升压变之间的母线经电阻接地;改变接地电阻的大小,模拟不同程度的接地故障;改变接地故障发生时刻,模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

[0066] 可选地,所述设置同步调相机出口短路故障,具体包括:

[0067] 设置升压变高压侧发生短路故障,令升压变高压侧母线经电阻接地;改变接地电阻的大小,模拟不同程度的接地故障;改变接地故障发生时刻,模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

[0068] 可选地,所述评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响,具体包括:

[0069] 评估同步调相机转子接地短路故障导致换相失败的概率;

[0070] 评估同步调相机出口短路故障导致换相失败的概率;

[0071] 评估同步调相机因辅助系统故障导致换相失败的概率。

[0072] 可选地,所述评估同步调相机转子接地短路故障导致换相失败的概率,具体包括:

[0073] 步骤S410、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,设置同步调相机发生转子接地故障;

[0074] 步骤S411、改变接地电阻的大小,模拟调相机转子不同程度的接地故障,计算直流换相失败的概率;

[0075] 步骤S412、改变转子接地时刻,模拟调相机转子接地故障发生时刻的随机性,计算直流换相失败的概率;

[0076] 步骤S413、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,重复步骤S411~S412,分析调相机不同运行状态下转子接地故障导致换相失败的概率。

[0077] 可选地,所述评估同步调相机出口短路故障导致换相失败的概率,具体包括:

[0078] 步骤S420、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,设置调相机出口短路故障;

[0079] 步骤S421、设置同步调相机与升压变之间的母线发生单相接地短路故障;

[0080] 步骤S422、改变接地电阻的大小,模拟不同程度的接地故障,计算直流换相失败的概率;

[0081] 步骤S423、改变接地故障发生时刻,模拟母线接地故障发生时刻的随机性,计算直流换相失败的概率;

[0082] 步骤S424、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,重复步骤S422~S423,分析调相机不同运行状态下母线短路故障导致换相失败的概率;

[0083] 步骤S425、令母线发生三相短路、两相短路故障、两相短路接地故障,重复步骤S422~S424;

[0084] 步骤S426、令升压变高压侧母线发生短路故障,重复步骤S421~S425。

[0085] 可选地,所述评估同步调相机因辅助系统故障调机导致换相失败的概率,具体包括:

[0086] 特高压直流输电系统为单/双极性运行,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,断开调相机升压变高压侧与500kV母线之间的断路器,计算直流换相失败的概率。

[0087] 可选地,直流系统发生换相失败的判断方法是当熄弧角 γ 小于给定最小熄弧角 γ_{\min} 时,即判断发生换相失败;

[0088] 考虑换流变压器的变比后,可得系统对称时逆变器熄弧角为:

$$[0089] \quad \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta \right)$$

[0090] 当逆变侧交流系统发生不对称故障并使换相线电压过零点前移角度 φ 时,逆变器熄弧角为:

$$[0091] \quad \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta \right) - \varphi$$

[0092] 其中, k 表示换流变变比, U 表示交流母线电压有效值, I_d 表示直流电流, L 表示换相电抗, β 表示触发超前角。

[0093] 根据本发明的第二方面,提供了一种计算机设备。

[0094] 在一个实施例中,上述计算机设备包括存储器和处理器,所述存储器存储有计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现上述方法的步骤。

[0095] 发明内容中提高的效果仅仅是实施例的效果,而不是发明所有的全部效果,上述技术方案中的一个技术方案具有如下优点或有益效果:

[0096] 本发明的评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,能够灵活设置同步调相机故障类型、同步调相机负荷及特高压直流输电负荷,可以准确评估同步调相机故障导致直流闭锁的概率;该方法简单有效,评估结果可为制定反事故措施提供理论依据,指导同步调相机的运维检修,可减少直流闭锁故障发生的概率,进而减少负荷损失,具有很大的经济效益和工程实用价值。

附图说明

[0097] 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,下面将对实施例或现有技术描述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。

[0098] 图1是本发明实施例方法的流程图;

[0099] 图2a是本发明实施例步骤S1的流程图;

[0100] 图2b是电机空载饱和和特性曲线图;

[0101] 图3是本发明实施例暂态增益衰减模型控制框图;

[0102] 图4是本发明实施例步骤S2的流程图;

[0103] 图5是变压器空载特性曲线示意图;

[0104] 图6a是HP12/24型滤波器的等值电路示意图;

[0105] 图6b是HP3型滤波器的等值电路示意图;

[0106] 图6c是SC型滤波器的等值电路示意图;

[0107] 图6d是HP6/30型滤波器等值电路示意图;

[0108] 图7是本发明实施例特高压直流输电系统的等效电路示意图;

[0109] 图8a是本发明实施例单极特高压直流输电系统的示意图;

[0110] 图8b是本发明实施例双极特高压直流输电系统的示意图;

[0111] 图9是本发明实施例步骤S3的流程图;

[0112] 图10是本发明实施例步骤S4的流程图;

[0113] 图11是本发明实施例计算机设备的示意图。

具体实施方式

[0114] 为能清楚说明本方案的技术特点,下面通过具体实施方式,并结合其附图,对本发明进行详细阐述。下文的公开提供了许多不同的实施例或例子用来实现本发明的不同结构。为了简化本发明的公开,下文中对特定例子的部件和设置进行描述。此外,本发明可以

在不同例子中重复参考数字和/或字母。这种重复是为了简化和清楚的目的,其本身不指示所讨论各种实施例和/或设置之间的关系。应当注意,在附图中所图示的部件不一定按比例绘制。本发明省略了对公知组件和处理技术及工艺的描述以避免不必要地限制本发明。

[0115] 如图1所示,本发明提供了一种评估同步调相机故障对特高压直流输电影响的方法,包括以下步骤:

[0116] S1、建立同步调相机数学模型;

[0117] S2、建立特高压直流输电系统数学模型;

[0118] S3、制定同步调相机故障扰动方案;

[0119] S4、评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响。

[0120] 上述实施例中,步骤序号并不作为对上述步骤执行顺序的限制。

[0121] 如图2a所示,步骤S1中建立同步调相机数学模型,具体包括:

[0122] S11、建立考虑饱和效应的同步调相机数学模型,该模型采用同步电机park方程。

[0123] 同步调相机可以看作没有原动力的同步发电机,可采用同步电机模型。通常,转子可分为d轴和q轴,d轴存在励磁绕组f和等效阻尼绕组D,q轴上存在等效阻尼绕组g和Q。当不考虑同步调相机饱和效应时,转子绕组的电压方程如下所示:

$$[0124] \quad \begin{cases} T''_{d0} \frac{de''_q}{dt} = e'_q - e''_q - (x'_d - x''_d) i_d \\ T'_{d0} \frac{de'_q}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - e'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x''_d} (e'_q - e''_q) \\ T''_{q0} \frac{de''_d}{dt} = e'_d - e''_d - (x'_q - x''_q) i_d \\ T'_{q0} \frac{de'_d}{dt} = -e'_d - \frac{x_q - x'_q}{x'_q - x''_q} (e'_d - e''_d) \end{cases}$$

[0125] 其中, e'_q 表示交轴暂态电势, e''_q 表示交轴次暂态电势, e'_d 表示直轴暂态电势, e''_d 表示直轴次暂态电势, u_f 表示励磁电压, x_d 表示纵轴同步电抗, x'_d 表示纵轴瞬态电抗, x''_d 表示纵轴超瞬态电抗, x_q 表示横轴同步电抗, x'_q 表示横轴瞬态电抗, x''_q 表示横轴超瞬态电抗, x_{af} 表示励磁绕组漏电抗, r_f 表示励磁绕组电阻, i_d 表示纵轴电流分量, i_q 表示横轴电流分量, T'_{d0} 表示纵轴开路暂态时间参数, T''_{d0} 表示纵轴开路超瞬态时间参数, T'_{q0} 表示横轴开路瞬态时间参数, T''_{q0} 表示横轴开路超瞬态时间常数。

[0126] 同步调相机起到提供紧急无功支撑的作用,会工作在过励磁状态,此时定子铁芯处于深度饱和状态,因此需要考虑定子铁芯饱和效应。引入饱和修正系数修正瞬态电势,得到考虑饱和效应的转子绕组电压方程,如下所示:

$$[0127] \quad \begin{cases} T_{d0}'' \frac{de_q''}{dt} = -e_q'' - (x_d' - x_d'')i_d + e_q' + T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} \\ T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} = \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d')i_d + (K_G - 1)e_q'] \\ T_{q0}'' \frac{de_d''}{dt} = -e_d'' + (x_q' - x_q'')i_q + e_d' + T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} \\ T_{q0}' \frac{de_d'}{dt} = -e_d' + (x_q - x_q')i_q \end{cases}$$

[0128] 其中, K_G 表示饱和系数, 计算公式如下:

$$[0129] \quad K_G = 1 + \frac{b}{a} e_q^{(n-1)}$$

[0130] 其中, e_q' 表示交轴暂态电势, $n-1$ 表示指数, a 、 b 、 n 表示饱和参数。

[0131] 发电机饱和的模拟过程如下:

[0132] 同步电机励磁电流与空载电势之间由于铁芯饱和而呈现非线性关系, 这种非线性关系可用电机空载饱和特性曲线来表示, 曲线的形状如图2b所示。

[0133] 不饱和时, 空载电势 $e_q(0)$ 等于不饱和的电枢反应电抗 x_{ad} 与励磁电流 i_f 的乘积, 即:

$$[0134] \quad e_q(0) = x_{ad} i_f$$

[0135] 饱和后, 同一励磁电流 i_f 只能产生如图2b所示 e_q 大小的电势。由图2b中的关系可得:

$$[0136] \quad e_q = e_q(0) \cdot \frac{i_f(0)}{i_f}$$

[0137] 其中, $i_f(0)$ 表示产生 e_q 所需的励磁电流。

[0138] 定义上式中 $i_f/i_f(0) = K_G$ 为饱和系数, 则有:

$$[0139] \quad e_q = \frac{1}{K_G} e_q(0)$$

[0140] 由此可见, 考虑饱和后对空载电磁的修正相当于其饱和值减去 ΔE_I :

[0141] 发电机带负荷后, 定子绕组流过电流, 此时饱和效应体现在合成气隙磁通的饱和上, 其饱和特性与空载饱和特性相同。对合成气隙磁通的饱和修正可近似地用对 e_q' 电势的修正来代替, 因此常用的发电机饱和修正方法可用下式对 e_q' 进行修正:

$$[0142] \quad e_q' = \frac{1}{K_G} e_q'(0)$$

[0143] 其中, e_q' 和 $e_q'(0)$ 分别为暂态电势的饱和值和非饱和值。

[0144] 以饱和值的 e_q' 代入暂态电势变化的微分方程, 可得:

$$\begin{aligned}
T_{d0}' \frac{de_q'}{dt} &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - K_G e_q' - (x_d - x_d') i_d \\
[0145] \quad &= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + (K_G - 1) e_q'] \\
&= \frac{x_{af}}{r_f} u_f - [e_q' + (x_d - x_d') i_d + \Delta E_I]
\end{aligned}$$

[0146] 为了进行数值计算,如何用数学方程式描述饱和系数 K_G 随 e_q' 值不同的变化是重要的。已知不饱和曲线 $i_f(0)$ 与 e_q' 的关系是线性的,如下式:

$$[0147] \quad i_f(0) = a e_q'$$

[0148] 饱和曲线 i_f 与 e_q' 的关系是非线性的,可近似表示为:

$$[0149] \quad i_f = a e_q' + b e_q'^n$$

[0150] 其中,a、b、n的参数值可根据实际饱和曲线用拟合的方法求出。

[0151] 根据饱和系数 K_G 的定义,可得:

$$[0152] \quad K_G = \frac{i_f}{i_f(0)} = 1 + \frac{b}{a} e_q'^{(n-1)}$$

[0153] 其中, e_q' 表示交轴暂态电势,n-1表示指数,a、b、n表示饱和参数。

[0154] S12、建立同步调相机励磁控制系统数学模型,该模型采用IEEE的标准ST5B模型。

[0155] 励磁系统准确建模是确保同步调相机充分发挥动态无功补偿作用的关键,电压环控制采用IEEE的标准ST5B模型。机端电压闭环调节方式是最基本的励磁控制方式,也是励磁运行的主要运行方式,又称为自动运行。机端电压闭环调节方式以同步调相机端电压作为调节量,调节的目的是维持同步调相机端电压与电压参考值一致,而电压参考值则主要由增磁命令(远方或就地)和减磁命令(远方或就地)进行调整。同步调相机空载时,电压参考值变化,使机端电压也随之变化;同步调相机带负载时,电压参考值变化仍然使机端电压随之变化,同时引起同步调相机无功功率更大范围变化。

[0156] 电压闭环调节方式遵循的调节规律为IEEE标准PID模式,也称为暂态增益衰减模型(TGR),暂态增益衰减模型控制框图如图3所示,其中, U_{ref} 表示电压参考值, U_k 表示触发角余弦值, U_g 表示电压测量值, U_f 表示整流桥输出电压值, K_p 表示开环增益系数, K_s 表示顶值电压系数, T_b 、 T_c 、 T_{b1} 、 T_{c1} 表示时间常数, T_s 表示移相及整流滞后时间, K_B 表示移相增益系数, U_T 表示整流桥交流侧电压标么值, K_h 表示硬负反馈系数, K_c 表示可控硅整流换相压降系数, I_{fe} 表示励磁机励磁电流, I_f 表示发电机励磁电流。

[0157] 如图4所示,步骤S2中,建立特高压直流输电系统数学模型,具体包括:

[0158] S21、建立电网等效电源数学模型,该模型采用电压源和阻抗串联进行等效。

[0159] 特高压直流输电系统送端(整流侧)和受端(逆变侧)与复杂的交流电网相连,送端往往接入550kV电压等级交流电网,受端采用分层接入的方式分别接入550kV和1050kV电压等级的交流电网。为简化计算,可将交流电网用戴维南等效电路表示,即理想电压源与戴维南等效阻抗 Z_{ac} 串联。对于戴维南等效阻抗 Z_{ac} 较小的系统,即强交流系统,交流系统的电压

变化相对较小,直流系统的换相失败也很少发生。若戴维南等效阻抗 Z_{ac} 很大,即交流系统为弱系统,那就可能产生诸如谐波谐振、谐波不稳定、换相失败等问题。交流系统强度与戴维南等效阻抗 Z_{ac} 相关联,可以用短路比(SCR)来表示。SCR被定义为交流系统短路容量SCL与直流系统额定容量 P_d 的比值,SCL的单位为MVA。

$$[0160] \quad SLC = \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}}$$

$$[0161] \quad SCR = \frac{SCL}{P_d} = \frac{E_{ac}^2}{P_d \cdot Z_{ac}}$$

[0162] 交流系统短路容量可以通过电力系统仿真软件计算得到,直流系统额定容量 P_d 往往是已知的,也就是说SCR可以认为是已知的。同时,母线电压 E_{ac} 可以认为是已知的,往往取额定电压。因此,交流电网戴维南等效阻抗 Z_{ac} 可以通过计算获得,即:

$$[0163] \quad Z_{ac} = \frac{E_{ac}^2}{SCR \cdot P_d}$$

[0164] 至此,建立了特高压直流输电系统送端和受端交流电网的等效数学模型。

[0165] S22、建立换流变数学模型,该模型采用考虑饱和效应的单相变压器。

[0166] $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电系统包含送端(整流侧)和受端(逆变侧),送端和受端又分为极I(+800kV)和极II(-800kV),极I又可分为极I低换流阀厅(0~400kV)和极I高换流阀厅(400~800kV),极II又可分为极II低换流阀厅(-400~0kV)和极II高换流阀厅(-800~-400kV)。每个换流阀厅的换流变的配置相同,例如,极I低换流阀厅包含6台换流变,可组成YN/Y和YN/D两组三相变压器组。

[0167] 表1示出了送端换流站换流变的配置的一个实施例,该实施例共24台换流变。

[0168] 表1

极性	换流阀厅	变比	联接方式	数量
[0169] 极 I	极 I 低	530/172.8kV	YN/Y	3
		530/172.8kV	YN/D	3
	极 I 高	530/172.8kV	YN/Y	3
		530/172.8kV	YN/D	3
极 II	极 II 低	530/172.8kV	YN/Y	3
[0170]	极 II 高	530/172.8kV	YN/D	3
		530/172.8kV	YN/Y	3
		530/172.8kV	YN/D	3

[0171] 表2示出了受端换流站换流变的配置的一个实施例,该实施例共24台换流变。

[0172] 表2

极性	换流阀厅	变比	联接方式	数量
[0173] 极 I	极 I 低	530/164.7kV	YN/Y	3
		1050/164.7kV	YN/D	3
	极 I 高	530/164.7kV	YN/Y	3
		1050/164.7kV	YN/D	3
极 II	极 II 低	530/164.7kV	YN/Y	3
		1050/164.7kV	YN/D	3
	极 II 高	530/164.7kV	YN/Y	3
		1050/164.7kV	YN/D	3

[0174] 为保证建模的准确性,可通过变压器空载特性曲线(V-I曲线)得到换流变的饱和特性,如图5所示。

[0175] S23、建立换流阀数学模型,该模型采用两个6脉动换流阀串联组成的12脉动换流阀进行等效。

[0176] ±800kV特高压直流输电系统包含送端和受端,送端和受端又分为极I和极II,极I又可分为极I低换流阀厅和极II高换流阀厅,极II又可分为极II低换流阀厅和极II高换流阀厅。每个换流阀厅是由两个6脉动换流阀串联组成的12脉动换流阀组成,则极I或极II是由两个换流阀串联组成的双12脉动换流电路。整流侧采用6脉动换流阀电路,整流侧输出直流电压为:

$$[0177] \quad U_d = 1.35U \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \omega L I_d$$

[0178] 其中, U_d 表示直流电压, U 表示交流电压有效值, α 表示触发角, L 表示换相电抗, I_d 表示直流电流。

[0179] 整流侧采用两个6脉动换流阀串联,触发角度间隔 30° ,组成12脉动换流阀电路,整流侧输出直流电压为:

$$[0180] \quad U_d = 2.7U \cos\alpha - \frac{6}{\pi} \omega L I_d$$

[0181] S24、建立直流输电线路数学模型,该模型采用T型等值电路,包括线路等效电阻和线路电容。

[0182] 特高压直流输电线路一般横跨多个省份,线路长度可达1000~2000km。正常运行中,直流线路中流过直流电流,不存在集肤效应。直流输电线路可以用T型网络表示,线路电容以位于线路中部的集中电容表示。

[0183] S25、建立平波电抗器数学模型,该模型采用2个电抗器,分别串联在直流母线和接地母线上。

[0184] 平波电抗器也称为直流电抗器,一般串联每个极换流器的直流输出端与直流线路之间以及换流阀与中性点母线之间,数学模型使用通用的电抗器模型即可。

[0185] 直流平波电抗器可在直流发生短路时抑制电流上升速度,防止继发换相失败;在小电流时保持电流的连续性;在正常运行时减小直流谐波。直流滤波器在谐振频率下呈谐振阻抗,从而达到抑制直流谐波的目的。通过平波电抗器和直流滤波器电路结构和参数的配合,可以更有效地抑制谐波。

[0186] S26、建立交流滤波器场数学模型,该模型分为500kV交流滤波器场和1000kV交流滤波器场,两个滤波器场均包括HP12/24、HP3型滤波器和并联电容器(SC)。

[0187] 交流滤波器有滤除换流器产生的谐波电流和向换流器通过部分基波无功两个任务,其元件包括高、低压电容器和电抗器、电阻器等,主要作用是为交流网和换流器提供所需的无功功率;当发生接地故障时,限制流入系统的故障电流;滤除交流侧特定次谐波和稳定交流电压。

[0188] 特高压直流输电系统送端换流站有一个500kV交流滤波器场,受端换流站交流滤波器场分为1000kV交流滤波器场和500kV交流滤波器场。1000kV交流滤波器共分2大组(12小组),总容量约为3300Mvar。1000kV交流滤波器共有8组HP12/24型滤波器,1组HP3型滤波器,3组并联电容器(SC),滤波器与并联电容器每组容量均为275Mvar。

[0189] 500kV交流滤波器共分3大组(14小组),总容量约为3390Mvar。500kV交流滤波器共有9组HP12/24型滤波器,1组HP3型滤波器,容量为255Mvar,4组并联电容器(SC),容量为210Mvar。

[0190] HP12/24型滤波器的等值电路如图6a所示,HP3型滤波器的等值电路如图6b所示,SC型滤波器的等值电路如图6c所示。

[0191] S27、建立直流滤波器数学模型,该模型包括HP12/24、HP6/30型滤波器。

[0192] 直流滤波器是专门为降低流入直流线路和接地极引线中的谐波分量而装设的,装设于极母线和极中性线之间。直流滤波器的主要作用是减小直流侧谐波分量,使直流电流波形平滑、小电流时保持电流连续;滤除直流侧高次谐波。

[0193] 送端换流站和受端换流站每极各有一组直流滤波器,每组直流滤波器分Z1、Z2两小组滤波器,每小组为双调谐滤波器,其中Z1为HP6/30,包括两座高压电容器塔,Z2为HP12/24,包括两座高压电容器塔,Z1和Z2共同投退。

[0194] HP6/30型滤波器等值电路如图6d所示。

[0195] S28、建立特高压直流控制系统数学模型,整流侧采用定电流控制和最小触发角 α_{min} 控制,逆变侧采用定电流控制和定熄弧角 γ 控制,整流侧和逆变侧均包含低压限流(VDCL)功能。

[0196] 特高压直流输电系统的等效电路如图7所示,整流侧和逆变侧的直流电压分别用 V_{dr} 和 V_{di} 来表示;整流侧和逆变侧的平波电抗器的电感分别用 L_{dr} 和 L_{di} 表示; L_d 和 R_d 分别表示1/2的直流线路电感和电阻值;直流输电线路总的对地电容用 C_{dc} 来表示;整流侧和逆变侧的直流电流分别用 I_{dr} 和 I_{di} 表示;对地电容上的电压值用 V_c 来表示;整流侧和逆变侧的理想空载直流电压分别用 V_{dcr} 和 V_{doi} 表示;整流侧和逆变侧的等效换相电阻分别用 R_{cr} 和 R_{ci} 来表示。

[0197] 稳态运行时,特高压直流输电系统的直流电流为:

$$[0198] \quad I_d = \frac{V_{dr} \cos \alpha - V_{di} \cos \beta}{2R_d + R_{cr} + R_{ci}}$$

[0199] 整流侧的传输功率为: $P_{dr} = V_{dr} \cdot I_d$

[0200] 逆变侧的接收功率为： $P_{di} = V_{di} \cdot I_d = P_{dr} - 2R_d \cdot I_{d2}$

[0201] 可见，直流系统的调节可以通过调节整流器的触发角 α 或者逆变器的触发超角 β （或熄弧角 γ ），即调节加到换流阀控制极或栅极的触发脉冲相位，快速而大范围的控制直流线路的电流、电压和功能，所需时间1~10ms。

[0202] 整流侧采用定电流和定最小触发角 α_{\min} 控制，同时配有低压限流环节。由逆变侧传来的电流指令减去实际测得的整流侧电流后，通过PI矫正环节得到 β 角，用 π 减去 β 后即得到触发角指令信号A0I。

[0203] 逆变侧采用定电流和定 γ 角控制，同时产生整流侧的电流指令。首先根据测量得到的逆变侧直流电压和电流，计算线路中间的直流电压，该电压通过低压限流环节产生电流指令，从该电流指令与给定电流指令中选取较小的一个作为整流侧电流指令。同时整流侧电流指令减去0.1pu的裕度后作为逆变侧定电流指令，该指令与实际测得的逆变侧电流相减后送入PI矫正环节，产生定电流控制的 β 角，该角度的范围为 $30^\circ \sim 110^\circ$ 。

[0204] S29、建立包含同步调相机的特高压直流输电系统模型。

[0205] 将3台同步调相机接入特高压直流输电系统受端500kV母线，同时考虑交流电网等效电源、交流滤波器组、直流滤波器组、滤波电抗器等，得到 ± 800 kV特高压直流输电系统完整模型。

[0206] 图8a示出了单极特高压直流输电系统（+800kV或-800kV）的一个实施例，图8b示出了双极特高压直流输电系统（ ± 800 kV）的一个实施例。

[0207] 上述实施例中，步骤序号并不作为对上述步骤执行顺序的限制。

[0208] 如图9所示，步骤S3中制定同步调相机故障扰动方案，具体包括：

[0209] S31、设置同步调相机转子接地短路故障。

[0210] 可选地，令励磁电压突然骤降，模拟转子滑环位置发生转子接地故障，经过一段时间后跳机。可选地，改变接地电阻的大小，模拟调相机转子不同程度的接地故障。可选地，改变转子接地时刻，模拟调相机转子接地故障发生时刻的随机性。

[0211] S32、设置同步调相机出口短路故障。

[0212] 在一些实施例中，设置同步调相机出口短路故障包括设置调相机与升压变之间发生短路故障。可选地，令调相机与升压变之间的母线经电阻接地，调节电阻大小，模拟不同程度的接地故障，例如，可以设置三相短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障、单相接地短路故障。可选地，改变接地电阻的大小，模拟不同程度的接地故障。可选地，改变接地故障发生时刻，模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

[0213] 在一些实施例中，设置同步调相机出口短路故障包括设置升压变高压侧发生短路故障。可选地，令升压变高压侧母线经电阻接地，调节电阻大小，模拟不同程度的接地故障。例如，可以设置三相短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障、单相接地短路故障。可选地，改变接地电阻的大小，模拟不同程度的接地故障。可选地，改变接地故障发生时刻，模拟母线接地故障发生时刻的随机性。

[0214] S33、设置调相机因辅助系统故障导致调相机跳机。

[0215] 例如，可令调相机带负荷-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar，经过一段时间后人为设定断路器断开，模拟调相机因辅助系统故障跳机。

[0216] 上述实施例中，步骤序号并不作为对上述步骤执行顺序的限制。

- [0217] 如图10所示,步骤S4中评估同步调相机故障对特高压直流输电的影响,具体包括:
- [0218] S41、评估同步调相机转子接地短路故障导致换相失败的概率;
- [0219] S42、评估同步调相机出口短路故障导致换相失败的概率;
- [0220] S43、评估同步调相机因辅助系统故障调机导致换相失败的概率。
- [0221] 上述实施例中,步骤序号并不作为对上述步骤执行顺序的限制。
- [0222] 可选地,S41、评估同步调相机转子接地短路故障导致换相失败的概率,具体包括:
- [0223] S410、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,设置同步调相机发生转子接地故障。
- [0224] S411、改变接地电阻的大小,模拟调相机转子不同程度的接地故障,计算直流换相失败的概率;
- [0225] S412、改变转子接地时刻,模拟调相机转子接地故障发生时刻的随机性,计算直流换相失败的概率;
- [0226] S413、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,重复步骤S411~S412,分析调相机不同运行状态下转子接地故障导致换相失败的概率。
- [0227] 可选地,S42、评估同步调相机出口短路故障导致换相失败的概率,具体包括:
- [0228] S420、令特高压直流输电系统为单/双极性运行时,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,设置调相机出口短路故障。
- [0229] S421、设置同步调相机与升压变之间的母线发生单相接地短路故障;
- [0230] S422、改变接地电阻的大小,模拟不同程度的接地故障,计算直流换相失败的概率;
- [0231] S423、改变接地故障发生时刻,模拟母线接地故障发生时刻的随机性,计算直流换相失败的概率;
- [0232] S424、令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,重复步骤S422~S423,分析调相机不同运行状态下母线短路故障导致换相失败的概率。
- [0233] S425、令母线发生三相短路、两相短路故障、两相短路接地故障,重复步骤S422~S424;
- [0234] S426、令升压变高压侧母线发生短路故障,重复步骤S421~S425。
- [0235] 可选地,S43、评估同步调相机因辅助系统故障调机导致换相失败的概率,包括:特高压直流输电系统为单/双极性运行,直流负荷分别为50%、80%、100%额定容量时,令调相机运行负荷分别为-150MVar、-75MVar、0MVar、75MVar、150MVar、300MVar,断开调相机升压变高压侧与500kV母线之间的断路器,计算直流换相失败的概率。
- [0236] 进一步地,换相失败是换流器常见的不正常运行状态,在换相过程中,如果预计关断的阀在承受反向电压期间未能完成换相或未能恢复阻断能力,则可能出现换相失败现象,即预计导通的换流阀将向预计关断的换流阀换相,预计导通的换流阀重新关断而预计关断的换流阀重新导通。
- [0237] 可能诱发直流换相失败的因素有交流系统故障、换流阀短路、换流阀误开通和不开通等,其中以交流系统故障引起的直流换相失败最为常见。直流输电系统大部分换相失

败发生于逆变侧,这是由于逆变侧的关断超前角一般很小,很容易受到各种故障和扰动的影响。而对于整流侧的换流阀,其关断后较长时间内承受的是反向电压,因此只有在触发电路存在故障导致换流阀误开通和不开通的情况下,整流侧才会发生换相失败。因此,通常情况下换相失败特指逆变器的换相失败,并且直流系统发生换相失败的判断方法是当熄弧角 γ 小于给定最小熄弧角 γ_{\min} 时,即判断发生换相失败。

[0238] 考虑换流变压器的变比后,可得系统对称时逆变器熄弧角为:

$$[0239] \quad \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta \right)$$

[0240] 其中,k表示换流变变比,U表示交流母线电压有效值, I_d 表示直流电流,L表示换相电抗, β 表示触发超前角。

[0241] 当逆变侧交流系统发生不对称故障并使换相线电压过零点前移角度 φ 时,逆变器熄弧角为:

$$[0242] \quad \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}kI_d\omega L}{U} + \cos\beta \right) - \varphi$$

[0243] 可见,当系统对称时,直流电流、超前角、换流母线线压力、换流变压器变比和换相电抗都会影响逆变器的熄弧角,从而导致换相失败。当系统不对称时,熄弧角还与换相线电压过零点相位移角度 φ 有关。

[0244] 根据换相失败发生的次数以及各次之间的顺序关系,换相失败又可分为一次换相失败、多次换相失败、连续换相失败和不连续换相失败。在一次交流系统故障中,逆变器发生换相失败的具体类型及暂态过称与故障的种类、程度、持续时间,直流系统参数、运行状态等因素密切相关。针对不同的直流系统以及故障类型,具体的故障发展过程应根据实际情况具体分析。

[0245] 通过设置调相机不同故障,可以引起500kV交流母线电压不同程度的波动,进而引起特高压直流换相失败。

[0246] 在一个实施例中,提供了一种计算机设备,该计算机设备可以是服务器,其内部结构图可以如图11所示。该计算机设备包括通过系统总线连接的处理器、存储器和网络接口。其中,该计算机设备的处理器用于提供计算和控制能力。该计算机设备的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统、计算机程序和数据库。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该计算机设备的数据库用于存储静态信息和动态信息数据。该计算机设备的网络接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机程序被处理器执行时以实现上述方法实施例中的步骤。

[0247] 本领域技术人员可以理解,图11中示出的结构,仅仅是与本发明方案相关的部分结构的框图,并不构成对本发明方案所应用于其上的计算机设备的限定,具体的计算机设备可以包括比图中所示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者具有不同的部件布置。

[0248] 在一个实施例中,还提供了一种计算机设备,包括存储器和处理器,存储器中存储有计算机程序,该处理器执行计算机程序时实现上述方法实施例中的步骤。

[0249] 在一个实施例中,提供了一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现上述方法实施例中的步骤。

[0250] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程,是可以

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非易失性计算机可读取存储介质中,该计算机程序在执行时,可包括如上述各方法的实施例的流程。其中,本发明所提供的各实施例中所使用的对存储器、存储、数据库或其它介质的任何引用,均可包括非易失性和易失性存储器中的至少一种。非易失性存储器可包括只读存储器(Read-Only Memory,ROM)、磁带、软盘、闪存或光存储器等。易失性存储器可包括随机存取存储器(Random Access Memory,RAM)或外部高速缓冲存储器。作为说明而非局限,RAM可以是多种形式,比如静态随机存取存储器(Static Random Access Memory,SRAM)或动态随机存取存储器(Dynamic Random Access Memory,DRAM)等。

[0251] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

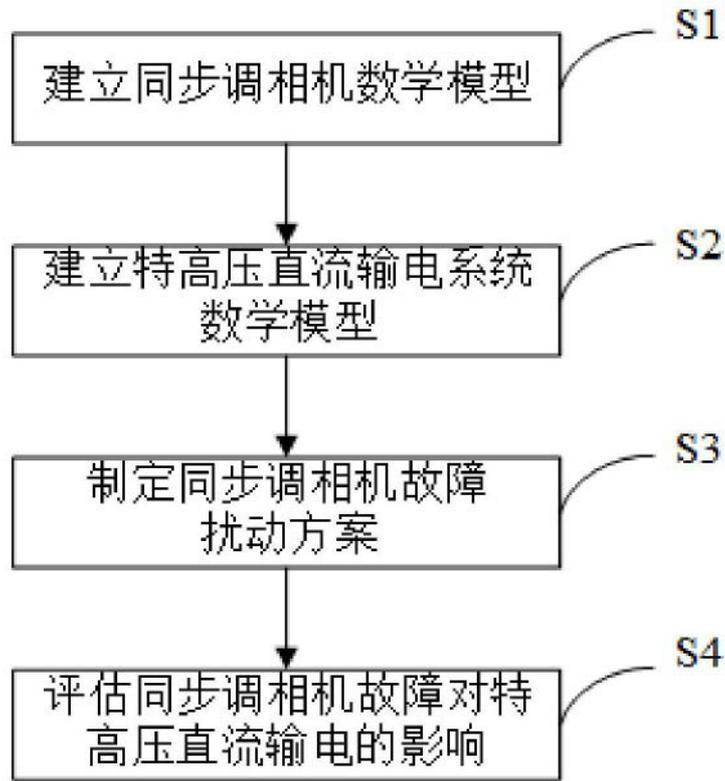


图1

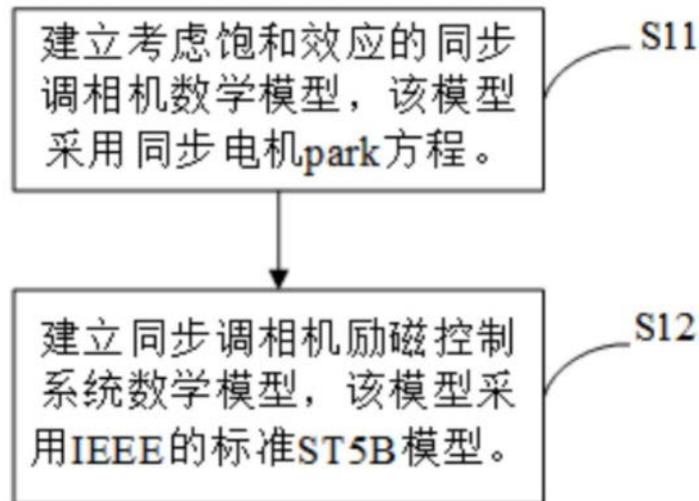


图2a

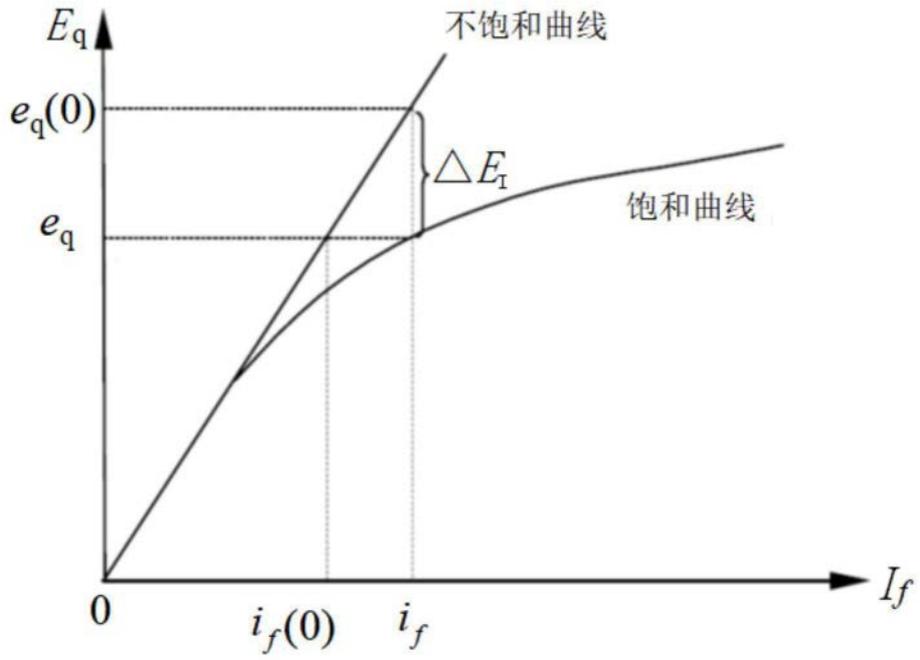


图2b

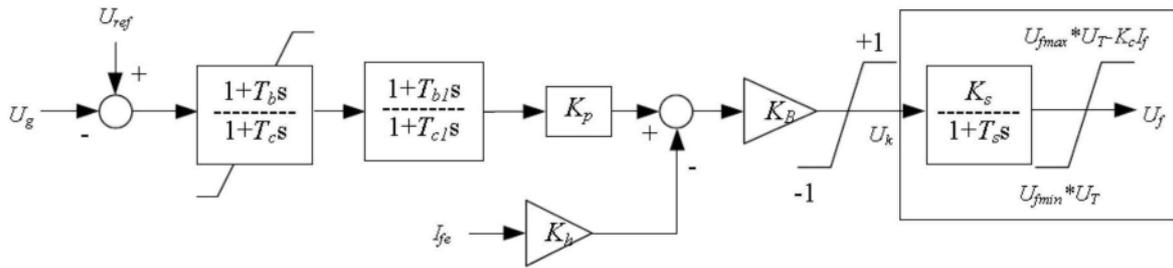


图3

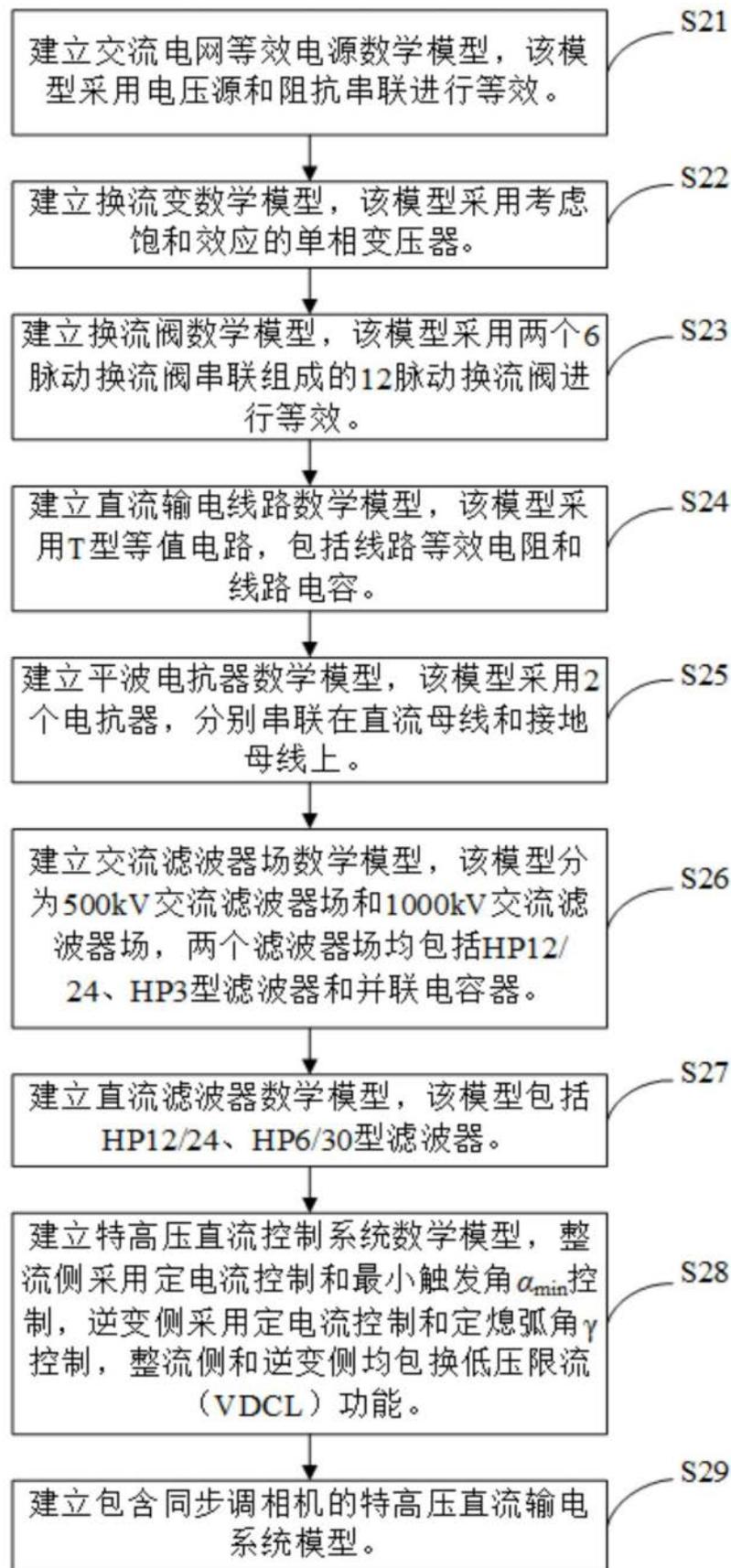


图4

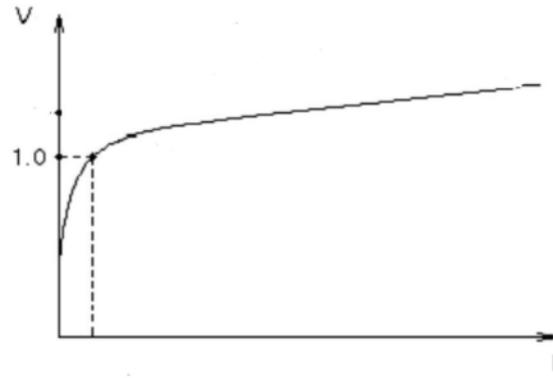


图5

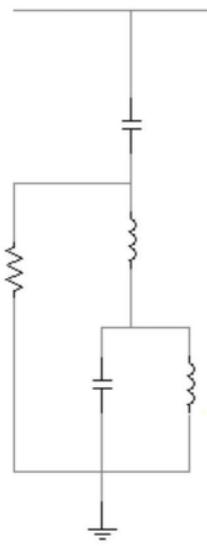


图6a

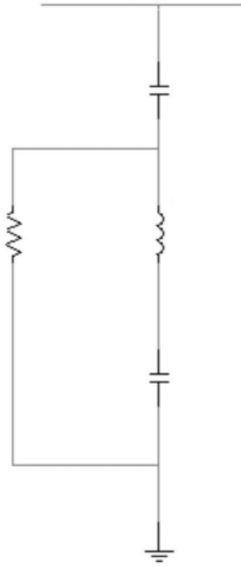


图6b

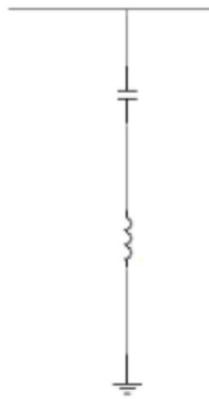


图6c

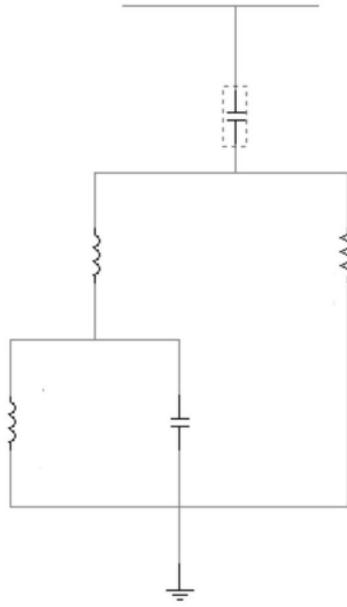


图6d

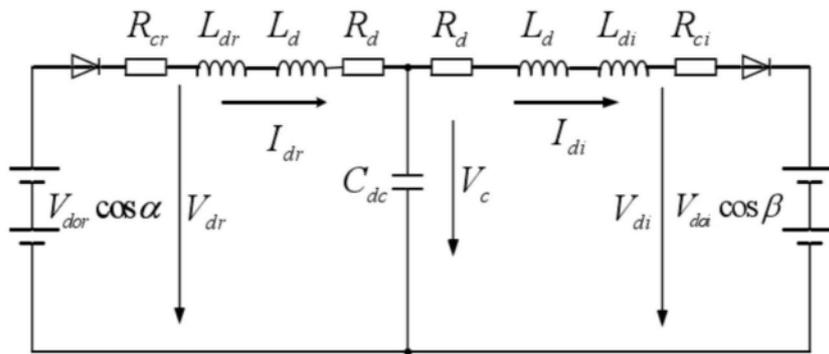


图7

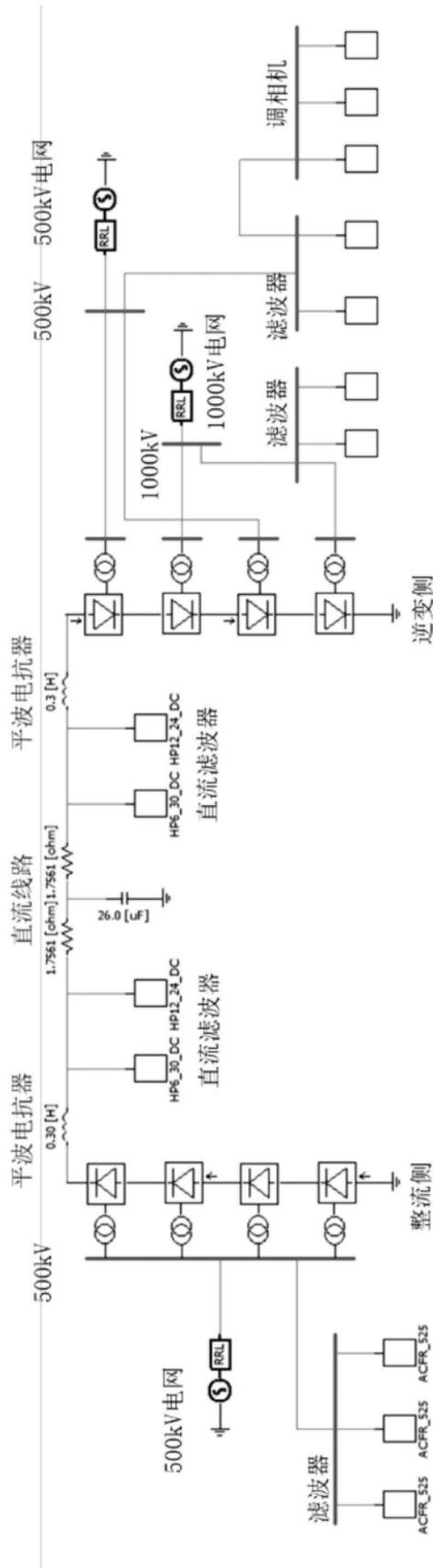


图8a

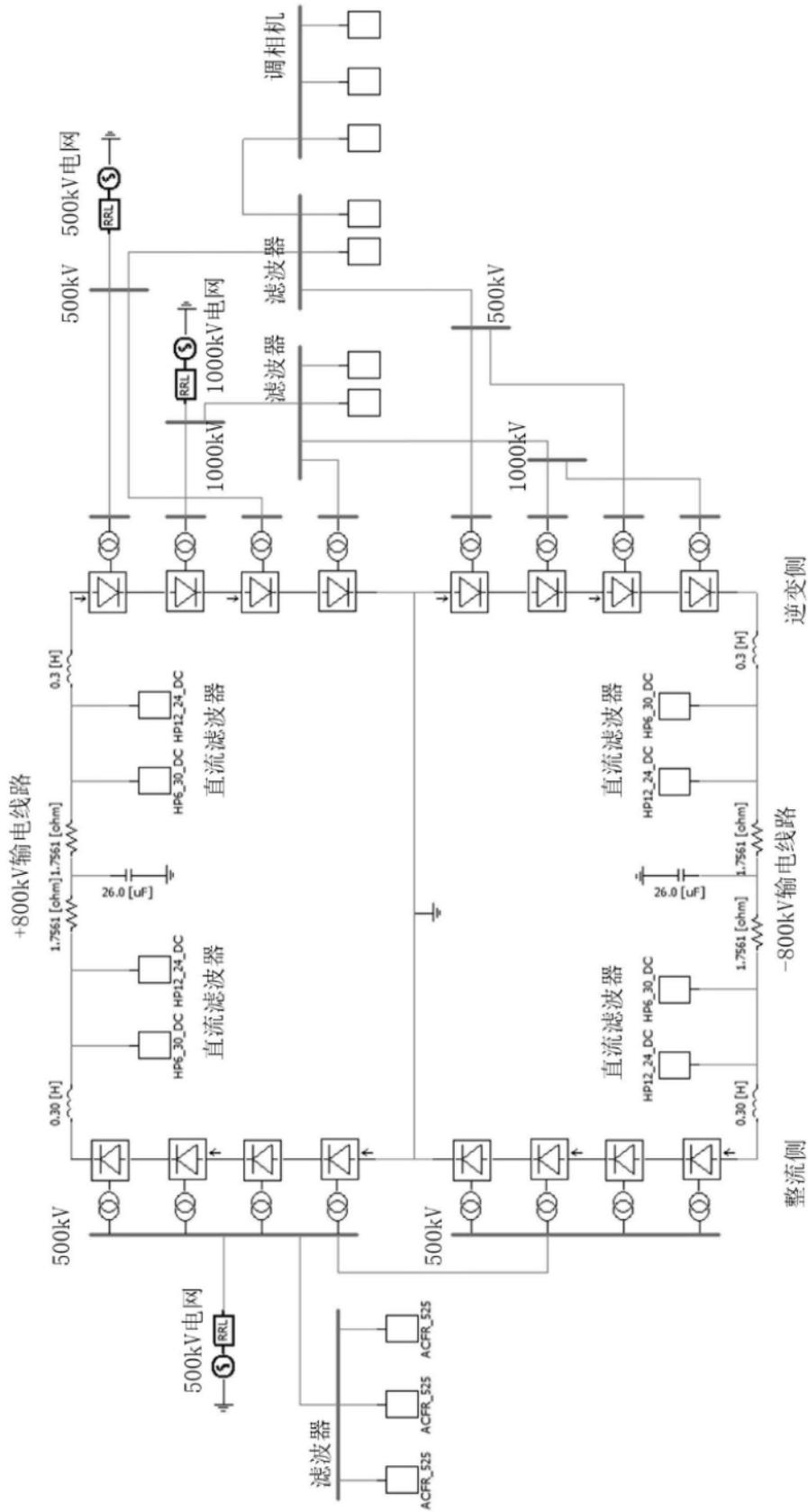


图8b

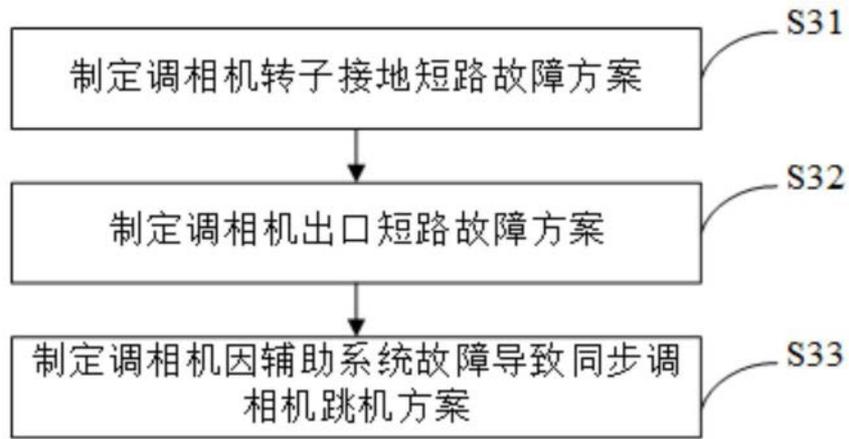


图9

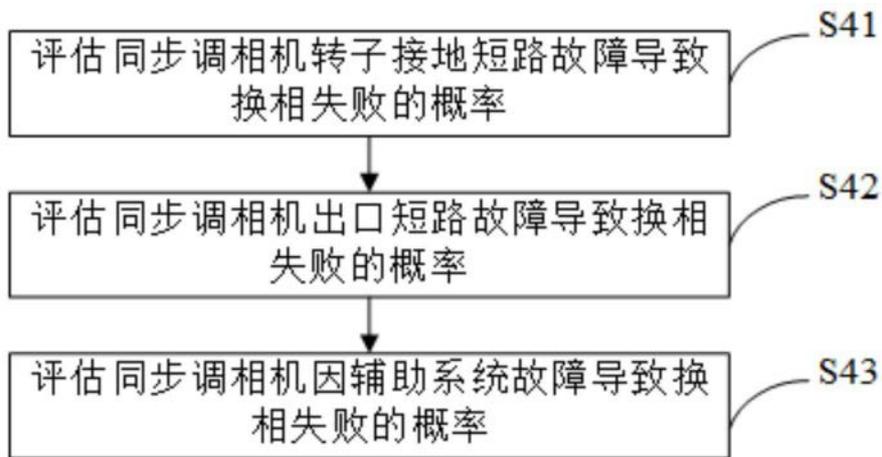


图10

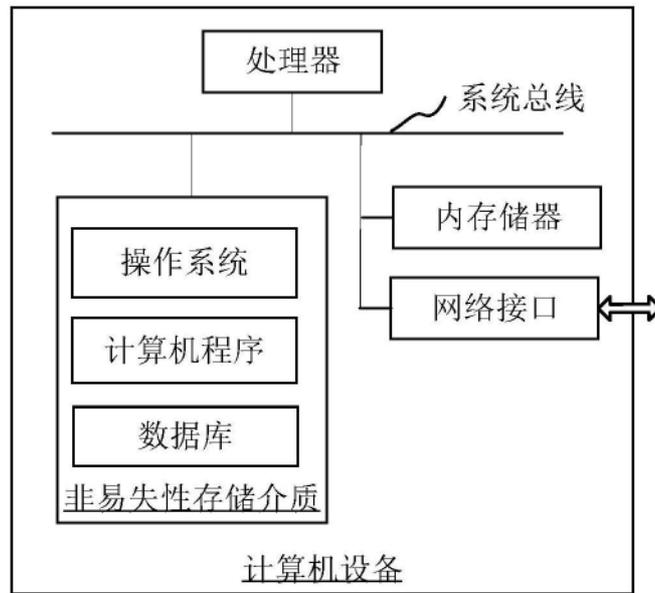


图11