



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108363846 A

(43)申请公布日 2018.08.03

(21)申请号 201810082496.X

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2018.01.29

G06F 17/50(2006.01)

H02J 3/00(2006.01)

(71)申请人 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

申请人 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院

(72)发明人 陈绪江 张星 徐得超 汪梦军 穆清 郑伟杰 彭红英 王艺璇 孙丽香 史东宇 刘敏 王祥旭 徐树文 王峰 郭袅 祖光鑫 徐冰亮

(74)专利代理机构 北京安博达知识产权代理有限公司 11271

代理人 徐国文

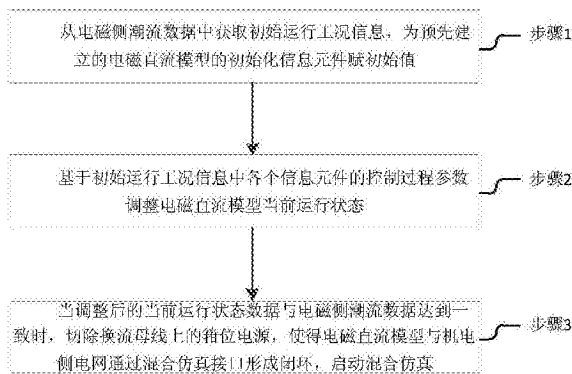
权利要求书4页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统

(57)摘要

本发明涉及一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统,包括:从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;当调整后的当前运行状态数据与电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。实现了大规模交直流电网机电-电磁混合仿真中电磁侧直流输电模型运行工况的快速自动调整,大大节省了交直流电网混合仿真构建时电磁直流模型运行方式人工调整的工作量,使得直流电磁模型运行方式的快速调整从而显著提高了仿真效率。



1. 一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法,其特征在于,所述方法包括:

从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;

当调整后的所述当前运行状态数据与所述电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述电磁直流模型是根据实际高压直流输电系统结构和特性建立的数学模型,包括:一次设备和直流控制保护模型;其中,

所述直流控制保护模型的输入参数,包括主控、低压限流控制、电流控制、电压控制、电压恢复控制、关断角控制、整流侧最小触发角控制、换相失败预测、抽头控制和无功控制参数;

所述一次设备包括具备抽头调节功能的换流变元件、初始化支撑电源,以及滤波器组;所述滤波器组设有携带投切次序标识的投切开关;所述初始化支撑电源为设置于换流母线上的电压幅值、相角可控的电压源元件。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值,包括:

在电磁直流模型中建立初始化信息元件;

通过潮流文件,建立与初始化信息元件的映射关系,获得机电-电磁混合仿真的电磁侧潮流数据;

从所述电磁侧潮流数据中读取电磁直流模型的初始运行工况信息,基于初始运行工况信息自定义常量,为初始化信息元件赋初始值。

4. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,所述初始运行工况信息包括:整流侧换流母线线电压有效值 $R\_V_{rms}$ 、整流侧换流母线线电压相角 $R\_V_{ang}$ 、逆变侧换流母线线电压有效值 $I\_V_{rms}$ 、逆变侧换流母线线电压相角 $I\_V_{ang}$ 、直流整流侧极1有功功率 $P_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1有功功率 $P_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极2有功功率 $P_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2有功功率 $P_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_R}$ 、直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_I}$ 、直流整流侧极1直流电压 $U_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1直流电压 $U_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极1直流电流 $I_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1直流电流 $I_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极2直流电压 $U_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2直流电压 $U_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧极2直流电流 $I_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2直流电流 $I_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧极1换流变标幺变比 $T_{Rp1}$ 、直流整流侧极2换流变标幺变比 $T_{Rp2}$ 、直流逆变侧极1换流变标幺变比 $T_{Ip1}$ 、直流逆变侧极2换流变标幺变比 $T_{Ip2}$ 、整流侧极1触发角 $\alpha_{Rp1}$ 、逆变侧极1关断角 $\gamma_{Ip1}$ 、整流侧极2触发角 $\alpha_{Rp2}$ 、逆变侧极2关断角 $\gamma_{Ip2}$ 和直流单双极运行方式 $Operation\_mode$ ;其中, $Operation\_mode$ 置0,表示停运;置1表示单极运行,置2表示双极运行。

5. 如权利要求4所述的方法,其特征在于,所述调整电磁直流模型当前运行状态,具体包括:对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的运行模式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理;并对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。

6. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述对换流母线上的箝位电源进行初始化处理包括:在整流侧、逆变侧换流母线位置建立箝位电源,其幅值、相角可控;从初始化信息元件获取 $R_{Vrms}$ 、 $R_{Vang}$ 、 $I_{Vrms}$ 、 $I_{Vang}$ 变量,使整流、逆变侧箝位电源与电磁侧潮流数据保持一致;其中, $R_{Vrms}$ 为整流侧换流母线线电压有效值, $R_{Vang}$ 为整流侧换流母线线电压相角, $I_{Vrms}$ 为逆变侧换流母线线电压有效值, $I_{Vang}$ 为逆变侧换流母线线电压相角。

7. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述运行模式初始化处理包括:从初始化信息元件获取直流单双极运行方式 $Operation\_mode$ 变量;

当 $Operation\_mode=0$ 时,执行预先制定的初始化双极闭锁逻辑,将电磁直流模型的双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开,将电磁直流模型的双极双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为闭合,将电磁直流模型的双极双站换流阀元件初始化为不触发状态;

当 $Operation\_mode=1$ 时,执行预先制定的初始化单极闭锁逻辑,将电磁直流模型的极2双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开,将电磁直流模型的极2双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为闭合,将电磁直流模型的极2双站换流阀元件初始化为不触发状态;

当 $Operation\_mode=2$ 时,执行预先制定的双极正常运行逻辑,将电磁直流模型的双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为闭合,将电磁直流模型的双极双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为断开,将电磁直流模型的双极双站换流阀元件初始化为接受触发状态。

8. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述控制指令初始化处理包括:从初始化信息元件获取控制指令初始化变量,并传递给电磁直流模型;

将逆变侧极1、极2关断角初始值 $\Gamma_{Ip1}$ 、 $\Gamma_{Ip2}$ 分别传递给逆变侧两极的关断角控制,作为关断角控制参考值;

$Pdc\_Rp1$ 、 $Pdc\_Rp2$ 分别为直流整流侧极1、极2直流有功功率初始值,分别传递给两极的极功率控制,作为直流功率参考值;

$Udc\_Rp1$ 、 $Udc\_Rp2$ 分别为直流整流侧极1、极2直流电压初始值,分别传递给两极的电压调节控制,作为直流电压参考值。

9. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述换流变抽头档位初始化处理包括,从初始化信息元件获取整流侧极1、极2换流变标幺变比 $T_{Rp1}$ 、 $T_{Rp2}$ ,以及逆变侧极1、极2换流变标幺变比 $T_{Ip1}$ 、 $T_{Ip2}$ ,记为 $T$ ;

根据不同的电压绕组,确定每站每极换流变抽头初始化位置,传递给相应换流变元件;根据所述换流变抽头初始化位置,调整换流变抽头位置。

10. 如权利要求9所述的方法,其特征在于,若换流变抽头为原边抽头,则每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:

$$Tap_{pos} = (T-1) / Tap_{step} + Tap_{posr}$$

若换流变抽头为副边抽头,则每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:

$$Tap_{pos} = -(T-1) / Tap_{step} + Tap_{posr}$$

其中, $Tap_{pos}$ 、 $Tap_{posr}$ 分别为抽头位置和额定抽头位置, $Tap_{step}$ 为抽头调节的分度。

11. 如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述对各组滤波器投切状态进行初始化处

理包括:从初始化信息元件中获取直流整流侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_R}$ 和直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_I}$ ,定义投入的交流滤波器组数约束条件;电磁直流模型根据预定义的投切次序标识和计算得到的滤波器组数,一次性将需要投入的多组滤波器投切开关状态控制为闭合,其余滤波器的投切开关控制为断开。

12.如权利要求11所述的方法,其特征在于,所述投入的交流滤波器组数约束条件通过下式确定:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \approx Q_{SC} \\ \left| Q_{SC} - \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \right| \leq \frac{1}{2} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_M \end{cases}$$

其中, $Q_{SC}$ 为各组滤波器的总输出容量, $M$ 、 $N$ 分别为应投入的滤波器组数和换流站配备滤波器的总组数; $Q_k$ 为各组滤波器的额定容量; $U$ 为换流母线线电压有效值; $U_r$ 为换流母线额定电压。

13.如权利要求5所述的方法,其特征在于,所述对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整包括:

a通过箝位电源启动电磁直流模型,使得混合仿真实接口不投入,混合仿真中机电侧网络不参与计算;

b、分别对整流侧和逆变侧的换流变抽头位置进行微调;

c、检测直流换流站流向交流系统的无功功率,并与电磁侧潮流数据对比,若偏差量为正且大于半组滤波器容量 $Q_k/2$ ,则根据投切次序标识再投一组滤波器;若偏差量为负且小于半组滤波器容量 $Q_k/2$ ,则根据投切次序标识再切一组滤波器;

d、投入混合仿真实接口,使得混合仿真中机电侧网络参与计算并通过接口与电磁直流模型形成仿真闭环,使得通过开关元件切除箝位电源。

14.如权利要求13所述的方法,其特征在于,所述分别对整流侧和逆变侧的换流变抽头位置进行微调包括:测量逆变侧直流电压,当 $(U_{dc\_Ip1m}-U_{dc\_Ip1})/U_{dc\_Ip1} > Tap_{step}/2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;

当 $(U_{dc\_Ip1m}-U_{dc\_Ip1})/U_{dc\_Ip1} < Tap_{step}/2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则下调1档,在副边则上调1档;

测量整流侧触发角,当 $\alpha_{m\_Rp1}-\alpha_{Rp1} > 2.5^\circ$ ,则整流站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;当 $\alpha_{mRp1}-\alpha_{Rp1} < -2.5^\circ$ ,则整流站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则下调1档,在副边则上调1档;

其中, $Tap_{step}$ 为抽头调节的分度, $U_{dc\_Ip1m}$ 表示逆变侧直流电压测量值; $U_{dc\_Ip1}$ 为直流逆变侧极1直流电压; $\alpha_{m\_Rp1}$ 表示整流侧实际触发角测量值, $\alpha_{Rp1}$ 表示整流侧极1触发角。

15.一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整系统,其特征在于,所述系统包括:

获取模块,用于从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

调整模块,用于基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流

模型当前运行状态；

混合仿真模块,用于当调整后的当前运行状态数据与电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。

16.如权利要求15所述的系统,其特征在于,所述调整模块包括:

自动初始化模块,用于对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的运行模式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理;

跟踪调整模块,用于对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。

## 一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于电力系统仿真分析技术领域,具体涉及一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统。

### 背景技术

[0002] 随着特高压交直流工程陆续投运,系统“强直弱交”问题突出,交直流、多直流之间的交互影响日益显著,电网运行特性日趋复杂。近年来,机电-电磁混合仿真在大电网分析中得到越来越多的应用,通过将直流输电及其周边区域采用电磁暂态建模、其它交流电网采用机电暂态建模,能够实现更加精细化的电网仿真,兼顾仿真精度和仿真规模,已成为大规模交直流电网仿真分析的重要工具。

[0003] 直流电磁暂态模型包含了大量电力电子开关和非线性控制元件,运行点一直处于非基波暂态过程中而难以基于基波潮流初始化,含多回直流电磁暂态模型的混合仿真数据建立、方式调整及平稳启动存在困难,制约了大电网分析的工作效率和仿真精度。

### 发明内容

[0004] 为解决上述现有技术中的不足,本发明提出了电磁直流模型初始工况自动调整的方法,在仿真启动之前,基于电磁侧潮流数据和相应算法对运行状态包括运行模式、控制指令、换流变抽头位置、滤波器投切等关键内容进行快速置位,并在启动计算阶段前期跟踪直流外特性进行自动微调,实现了直流工况智能化调整及能够迅速进入潮流指定工况的效果,使含大量电磁直流模型的机电-电磁暂态混合仿真作业建立工作量大幅度缩减,甚至经过必要开发可以实现含大量电磁直流模型的混合仿真作业自动建立,大幅度改善了大规模交直流电网机电-电磁混合仿真的应用便利性,具有很好的推广前景。

[0005] 本发明的目的是采用下述技术方案实现的:

[0006] 一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法,所述方法包括:

[0007] 从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

[0008] 基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;

[0009] 当调整后的所述当前运行状态数据与所述电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。

[0010] 优选的,所述电磁直流模型是根据实际高压直流输电系统结构和特性建立的数学模型,包括:一次设备和直流控制保护模型;其中,

[0011] 所述直流控制保护模型的输入参数,包括主控、低压限流控制、电流控制、电压控制、电压恢复控制、关断角控制、整流侧最小触发角控制、换相失败预测、抽头控制和无功控制参数;

[0012] 所述一次设备包括具备抽头调节功能的换流变元件、初始化支撑电源,以及滤波器组;所述滤波器组设有携带投切次序标识的投切开关;所述初始化支撑电源为设置于换流母线上的电压幅值、相角可控的电压源元件。

[0014] 优选的,所述从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值,包括:

[0015] 在电磁直流模型中建立初始化信息元件;

[0016] 通过潮流文件,建立与初始化信息元件的映射关系,获得机电-电磁混合仿真的电磁侧潮流数据;

[0017] 从所述电磁侧潮流数据中读取电磁直流模型的初始运行工况信息,基于初始运行工况信息自定义常量,为初始化信息元件赋初始值。

[0018] 进一步地,所述初始运行工况信息包括:整流侧换流母线线电压有效值 $R\_V_{rms}$ 、整流侧换流母线线电压相角 $R\_V_{ang}$ 、逆变侧换流母线线电压有效值 $I\_V_{rms}$ 、逆变侧换流母线线电压相角 $I\_V_{ang}$ 、直流整流侧极1有功功率 $P_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1有功功率 $P_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极2有功功率 $P_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2有功功率 $P_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_R}$ 、直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量 $Q_{c\_I}$ 、直流整流侧极1直流电压 $U_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1直流电压 $U_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极1直流电流 $I_{dc\_Rp1}$ 、直流逆变侧极1直流电流 $I_{dc\_Ip1}$ 、直流整流侧极2直流电压 $U_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2直流电压 $U_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧极2直流电流 $I_{dc\_Rp2}$ 、直流逆变侧极2直流电流 $I_{dc\_Ip2}$ 、直流整流侧极1换流变标幺变比 $T\_Rp1$ 、直流整流侧极2换流变标幺变比 $T\_Rp2$ 、直流逆变侧极1换流变标幺变比 $T\_Ip1$ 、直流逆变侧极2换流变标幺变比 $T\_Ip2$ 、整流侧极1触发角 $\alpha_{Rp1}$ 、逆变侧极1关断角 $\gamma_{Ip1}$ 、整流侧极2触发角 $\alpha_{Rp2}$ 、逆变侧极2关断角 $\gamma_{Ip2}$ 和直流单双极运行方式 $Operation\_mode$ ;其中, $Operation\_mode$ 置0,表示停运;置1表示单极运行,置2表示双极运行。

[0019] 进一步地,所述调整电磁直流模型当前运行状态,具体包括:对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的运行模式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理;并对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。

[0020] 进一步地,,所述对换流母线上的箝位电源进行初始化处理包括:在整流侧、逆变侧换流母线位置建立箝位电源,其幅值、相角可控;从初始化信息元件获取 $R\_V_{rms}$ 、 $R\_V_{ang}$ 、 $I\_V_{rms}$ 、 $I\_V_{ang}$ 变量,使整流、逆变侧箝位电源与电磁侧潮流数据保持一致;其中, $R\_V_{rms}$ 为整流侧换流母线线电压有效值, $R\_V_{ang}$ 为整流侧换流母线线电压相角, $I\_V_{rms}$ 为逆变侧换流母线线电压有效值, $I\_V_{ang}$ 为逆变侧换流母线线电压相角。

[0021] 进一步地,所述运行模式初始化处理包括:从初始化信息元件获取直流单双极运行方式 $Operation\_mode$ 变量;

[0022] 当 $Operation\_mode=0$ 时,执行预先制定的初始化双极闭锁逻辑,将电磁直流模型的双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开,将电磁直流模型的双极双站换流阀的旁通开关BPP状态初始化为闭合,将电磁直流模型的双极双站换流阀元件初始化为不触发状态;

[0023] 当 $Operation\_mode=1$ 时,执行预先制定的初始化单极闭锁逻辑,将电磁直流模型的极2双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开,将电磁直流模型的极2双站换流阀

的旁通开关BPB状态初始化为闭合,将电磁直流模型的极2双站换流阀元件初始化为不触发状态;

[0024] 当Operation\_mode=2时,执行预先制定的双极正常运行逻辑,将电磁直流模型的双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为闭合,将电磁直流模型的双极双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为断开,将电磁直流模型的双极双站换流阀元件初始化为接受触发状态。

[0025] 进一步地,所述控制指令初始化处理包括:从初始化信息元件获取控制指令初始化变量,并传递给电磁直流模型;

[0026] 将逆变侧极1、极2关断角初始值Gamma\_Ip1、Gamma\_Ip2分别传递给逆变侧两极的关断角控制,作为关断角控制参考值;

[0027] Pdc\_Rp1、Pdc\_Rp2分别为直流整流侧极1、极2直流有功功率初始值,分别传递给两极的极功率控制,作为直流功率参考值;

[0028] Udc\_Rp1、Udc\_Rp2分别为直流整流侧极1、极2直流电压初始值,分别传递给两极的电压调节控制,作为直流电压参考值。

[0029] 进一步地,所述换流变抽头档位初始化处理包括,从初始化信息元件获取整流侧极1、极2换流变标么变比T\_Rp1、T\_Rp2,以及逆变侧极1、极2换流变标么变比T\_Ip1、T\_Ip2,记为T;

[0030] 根据不同的电压绕组,确定每站每极换流变抽头初始化位置,传递给相应换流变元件;根据所述换流变抽头初始化位置,调整换流变抽头位置。

[0031] 进一步地,若换流变抽头为原边抽头,则每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:

$$[0032] \quad \text{Tap}_{\text{pos}} = (T-1) / \text{Tap}_{\text{step}} + \text{Tap}_{\text{posr}}$$

[0033] 若换流变抽头为副边抽头,则每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:

$$[0034] \quad \text{Tap}_{\text{pos}} = -(T-1) / \text{Tap}_{\text{step}} + \text{Tap}_{\text{posr}}$$

[0035] 其中, Tap<sub>pos</sub>、Tap<sub>posr</sub>分别为抽头位置和额定抽头位置, Tap<sub>step</sub>为抽头调节的分度。

[0036] 进一步地,所述对各组滤波器投切状态进行初始化处理包括:从初始化信息元件中获取直流整流侧补偿电容器滤波器总容量Q<sub>c\_R</sub>和直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量Q<sub>c\_I</sub>,定义投入的交流滤波器组数约束条件;电磁直流模型根据预定义的投切次序标识和计算得到的滤波器组数,一次性将需要投入的多组滤波器投切开关状态控制为闭合,其余滤波器的投切开关控制为断开。

[0037] 进一步地,所述投入的交流滤波器组数约束条件通过下式确定:

$$[0038] \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \approx Q_{SC} \\ \left| Q_{SC} - \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \right| \leq \frac{1}{2} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_M \end{cases}$$

[0039] 其中, Q<sub>sc</sub>为各组滤波器的总输出容量, M、N分别为应投入的滤波器组数和换流站配备滤波器的总组数; Q<sub>k</sub>为各组滤波器的额定容量; U为换流母线线电压有效值; U<sub>r</sub>为换流母线额定电压。



[0040] 进一步地,所述对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整包括:

[0041] a通过箝位电源启动电磁直流模型,使得混合仿真接口不投入,混合仿真中机电侧网络不参与计算;

[0042] b、分别对整流侧和逆变侧的换流变抽头位置进行微调;

[0043] c、检测直流换流站流向交流系统的无功功率,并与电磁侧潮流数据对比,若偏差量为正且大于半组滤波器容量 $Q_k/2$ ,则根据投切次序标识再投一组滤波器;若偏差量为负且小于半组滤波器容量 $Q_k/2$ ,则根据投切次序标识再切一组滤波器;

[0044] d、投入混合仿真接口,使得混合仿真中机电侧网络参与计算并通过接口与电磁直流模型形成仿真闭环,使得通过开关元件切除箝位电源。

[0045] 进一步地,所述分别对整流侧和逆变侧的换流变抽头位置进行微调包括:测量逆变侧直流电压,当 $(U_{dc\_Ip1m}-U_{dc\_Ip1})/U_{dc\_Ip1} > Tap_{step}/2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;

[0046] 当 $(U_{dc\_Ip1m}-U_{dc\_Ip1})/U_{dc\_Ip1} < Tap_{step}/2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则下调1档,在副边则上调1档;

[0047] 测量整流侧触发角,当 $\alpha_{m\_Rp1}-\alpha_{Rp1} > 2.5^\circ$ ,则整流站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;当 $\alpha_{m\_Rp1}-\alpha_{Rp1} < -2.5^\circ$ ,则整流站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则下调1档,在副边则上调1档;

[0048] 其中, $Tap_{step}$ 为抽头调节的分度, $U_{dc\_Ip1m}$ 表示逆变侧直流电压测量值; $U_{dc\_Ip1}$ 为直流逆变侧极1直流电压; $\alpha_{m\_Rp1}$ 表示整流侧实际触发角测量值, $\alpha_{Rp1}$ 表示整流侧极1触发角。

[0049] 一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整系统,所述系统包括:

[0050] 获取模块,用于从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

[0051] 调整模块,用于基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;

[0052] 混合仿真模块,用于当调整后的当前运行状态数据与电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。

[0053] 优选的,所述调整模块包括:

[0054] 自动初始化模块,用于对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的运行模式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理;

[0055] 跟踪调整模块,用于对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。

[0056] 与最接近的现有技术相比,本发明具有如下有益效果:

[0057] 本发明提供一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统,从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;能够直接获取机电-电磁暂态混合仿真中潮流计算的结果并自动实现电磁直流模型的初始化,相比较常见电磁直流模型,本发明实现了电磁直流模型运行方式基于潮流计算结果的自动初始化,不需要人工调整,大幅度提高了电磁直流模型使用的便利性。

[0058] 基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前

运行状态;能够在仿真启动之前就使电磁直流模型的运行工况调整到大致合理的范围。启动计算阶段只需要快速微调就能达到潮流指定的运行状态,相比较电磁直流精细化模型的启动过程。将自动初始化调整的过程缩减到1s以内,省去了精细化模型或实际工程中不被仿真所关注的直流运行工况缓慢调整过程,该过程一般需要数秒到数十秒,占用了大量的计算资源。

[0059] 当调整后的当前运行状态数据与电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。具有广泛适用性、高度自动化,能够大幅度提高交直流电网混合仿真分析的工作效率,提高混合仿真的自动化程度,适用于大规模交直流电网大批量仿真分析和基于在线数据的混合仿真分析,也适用于一般的直流输电电磁暂态仿真分析。该方案的提出,实现了大规模交直流电网机电-电磁混合仿真中电磁侧直流输电模型运行工况的快速自动调整,大幅度节省了交直流电网混合仿真构建时电磁直流模型运行方式人工调整的工作量,且实现了直流电磁模型运行方式的快速调整从而显著提高了仿真效率,具有很好的实用推广价值。

## 附图说明

[0060] 图1为本发明实施例中的电磁直流模型运行工况自动调整方法流程图;

[0061] 图2为本发明实施例中的初始化信息元件内容示意图;

[0062] 图3为本发明实施例中的初始化信息从潮流获取的功能流程图;

[0063] 图4为本发明实施例中的电磁直流模型自动初始化控制构成示意图;

[0064] 图5为本发明实施例中的应用效果展示图。

## 具体实施方式

[0065] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

[0066] 本发明涉及一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整方法及系统,在仿真启动之前,电磁侧基于潮流数据和相应算法对直流初始状态包括运行指令、换流变抽头位置、滤波器投切等运行方式的关键内容进行快速置位,并在启动计算阶段前期跟踪直流外特性进行自动微调。本发明流程图如图1所示,所述方法主要包括下述步骤:

[0067] 步骤1:从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息,为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

[0068] 步骤2:基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;

[0069] 步骤3:当调整后的所述当前运行状态数据与所述电磁侧潮流数据达到一致时,切除换流母线上的箝位电源,使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。

[0070] 步骤1中,包括:

[0071] 1、建立满足运行方式自动调整需要的标准化电磁直流模型,该模型需基于下述高压直流输电系统建模技术原则建立:

[0072] a、标准化电磁直流模型包括一次系统和换流站级控制系统模型和参数;

[0073] b、直流控制保护模型包括主控、低压限流控制、电流控制、电压控制、电压恢复控

制、关断角控制、整流侧最小触发角控制、换相失败预测、抽头控制、无功控制等,简化冗余控制、系统通信、与仿真无关的保护功能;

[0074] c、通过实测和校核建立与实际高压直流输电系统结构、特性基本一致的数学模型,换流变元件需能进行抽头调节,滤波器组需搭建投切开关并配置投切顺序;

[0075] d、在换流母线上建立电压幅值、相角可控的理想电压源元件作为初始化支撑电源。

[0076] 2、从机电-电磁混合仿真的潮流数据中提取直流电磁模型初始运行工况信息到电磁直流模型的初始化信息元件,初始化信息元件的内容构成如图2所示,直流初始化信息从潮流获取的功能流程如图3所示。具体方法为:

[0077] a、在电磁直流模型中建立初始化信息元件,该元件包括了直流初始运行工况信息,在仿真中为电磁直流模型提供相关初始化变量;

[0078] b、定义XML中间格式文件,描述从潮流文件至直流模型初始化数据的映射关系;

[0079] c、开发通用的XML读写程序,实现从潮流文件获取直流模型的初始化数据,更新到初始化信息元件;

[0080] d、所述初始化信息元件包含的初始化信息元件,由从潮流结果获取的以下变量构成:

[0081] R\_Vrms:整流侧换流母线线电压有效值(p.u.)

[0082] R\_Vang:整流侧换流母线线电压相角(度)

[0083] I\_Vrms:逆变侧换流母线线电压有效值(p.u.)

[0084] I\_Vang:逆变侧换流母线线电压相角(度)

[0085] Pdc\_Rp1:直流整流侧极1有功功率(MW)

[0086] Pdc\_Ip1:直流逆变侧极1有功功率(MW)

[0087] Pdc\_Rp2:直流整流侧极2有功功率(MW)

[0088] Pdc\_Ip2:直流逆变侧极2有功功率(MW)

[0089] Qc\_R:直流整流侧补偿电容器滤波器总容量(MVAR)

[0090] Qc\_I:直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量(MVAR)

[0091] Udc\_Rp1:直流整流侧极1直流电压(kV)

[0092] Udc\_Ip1:直流逆变侧极1直流电压(kV)

[0093] Idc\_Rp1:直流整流侧极1直流电流(kA)

[0094] Idc\_Ip1:直流逆变侧极1直流电流(kA)

[0095] Udc\_Rp2:直流整流侧极2直流电压(kV)

[0096] Udc\_Ip2:直流逆变侧极2直流电压(kV)

[0097] Idc\_Rp2:直流整流侧极2直流电流(kA)

[0098] Idc\_Ip2:直流逆变侧极2直流电流(kA)

[0099] T\_Rp1:直流整流侧极1换流变标幺变比;

[0100] T\_Rp2:直流整流侧极2换流变标幺变比;

[0101] T\_Ip1:直流逆变侧极1换流变标幺变比;

[0102] T\_Ip2:直流逆变侧极2换流变标幺变比;

[0103] Alpha\_Rp1:整流侧极1触发角(度)

- [0104] Gamma\_Ip1: 逆变侧极1关断角(度)
- [0105] Alpha\_Rp2: 整流侧极2触发角(度)
- [0106] Gamma\_Ip2: 逆变侧极2关断角(度)
- [0107] Operation\_mode: 直流单双极运行方式(0: 停运; 1: 单极运行, 2: 双极运行)
- [0108] 步骤2中, 调整当前运行状态, 具体包括: 对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的初始运行方式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理; 并对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。
- [0109] 1、基于初始化信息元件的输出, 对换流母线位置的箝位电源、电磁直流模型的初始运行方式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行自动调整。电磁直流模型运行工况自动初始化功能模块构成如图4所示。具体方法为:
- [0110] a、所述箝位电源初始化, 在整流侧、逆变侧换流母线位置建立箝位电源, 其幅值、相角可控, 由三个单相受控源、三组根据幅值和相角产生50Hz正弦波的控制逻辑来实现, 初始化时从初始化信息元件获取R\_Vrms、R\_Vang、I\_Vrms、I\_Vang变量, 使整流、逆变侧箝位电源与潮流保持一致;
- [0111] b、所述运行方式初始化, 建立电磁直流模型的初始化单、双极闭锁逻辑, 初始化时从初始化信息元件获取Operation\_mode变量。
- [0112] 当Operation\_mode=0时, 执行初始化双极闭锁逻辑, 将双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开, 将双极双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为闭合, 将双极双站换流阀元件初始化为不触发状态。
- [0113] 当Operation\_mode=1时, 执行初始化单极闭锁逻辑, 将极2双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为断开, 将极2双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为闭合, 将极2双站换流阀元件初始化为不触发状态。
- [0114] 当Operation\_mode=2时, 执行双极正常运行逻辑, 将双极双站换流阀交流侧进线断路器状态初始化为闭合, 将双极双站换流阀的旁通开关BPB状态初始化为断开, 将双极双站换流阀元件初始化为接受触发状态。
- [0115] c、所述控制指令初始化, 建立控制指令初始化逻辑, 初始化时从初始化信息元件获取下述控制指令初始化变量, 并传递给电磁直流控制模型:
- [0116] Gamma\_Ip1、Gamma\_Ip2: 逆变侧极1、极2关断角初始值, 分别传递给逆变侧两极的关断角控制, 作为关断角控制参考值;
- [0117] Pdc\_Rp1、Pdc\_Rp2: 直流整流侧极1、极2直流有功功率初始值, 分别传递给两极的极功率控制, 作为直流功率参考值;
- [0118] Udc\_Rp1、Udc\_Rp2: 直流整流侧极1、极2直流电压初始值, 分别传递给两极的电压调节控制, 作为直流电压参考值。
- [0119] d、所述换流变抽头档位初始化, 建立换流变抽头档位初始化逻辑, 初始化时从初始化信息元件获取下述变量, 并对抽头档位进行初始化, 具体方法为:
- [0120] T\_Rp1, T\_Rp1, T\_Rp1, T\_Rp1: 对应整流侧极1、极2换流变标么变比, 逆变侧极1、极2换流变标么变比, 在公式中记为T;
- [0121] 抽头在原边时, 每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:
- [0122]  $Tap_{pos} = (T-1) / Tap_{step} \text{四舍五入取整} + Tap_{posr}$

[0123] 抽头在副边时,每站每极换流变抽头初始化位置计算方法为:

[0124]  $Tap_{pos} = -(T-1) / Tap_{step} \text{四舍五入取整} + Tap_{posr}$

[0125] 其中: $Tap_{pos}$ , $Tap_{posr}$ 分别为抽头位置和额定抽头位置; $T$ 为根据潮流结果得到的换流变标么变比; $Tap_{step}$ 为抽头调节的分度,即抽头调节一档变比改变的百分比。

[0126] 最后,将计算得到的 $Tap_{pos}$ 传递给相应的换流变元件。

[0127] e、所述各组滤波器投切状态初始化,建立滤波器投切状态初始化逻辑,初始化时从初始化信息元件获取下述变量,并对各组滤波器投切状态进行初始化,具体方法为:

[0128]  $Q_{c\_R}$ :直流整流侧补偿电容器滤波器总容量(MVAR)

[0129]  $Q_{c\_I}$ :直流逆变侧补偿电容器滤波器总容量(MVAR)

[0130] 投入的交流滤波器组数应该满足如下关系,“ $\approx$ ”两侧的偏差量小于下一组滤波器额定容量:

$$[0131] \begin{cases} \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \approx Q_{SC} \\ \left| Q_{SC} - \sum_{k=1}^{M \leq N} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_k \right| \leq \frac{1}{2} \left( \frac{U}{U_r} \right)^2 Q_M \end{cases}$$

[0132] 其中:

[0133]  $M$ 、 $N$ :分别为应投入的滤波器组数和换流站配备滤波器的总组数;

[0134]  $Q_k$ :为各组滤波器的额定容量,Mvar;

[0135]  $U$ :为换流母线电压有效值,kV;

[0136]  $U_r$ :为换流母线额定电压,也即滤波器额定容量对应的电压,kV。

[0137] 在电磁直流模型中建立多组交流滤波器的投切逻辑,按照顺序和计算得到的滤波器组数,一次性将需要投入的多组滤波器投切开关状态控制为闭合,其余滤波器的投切开关控制为断开。

[0138] 2、电磁直流模型在箝位电源支撑下先启动运行,基于快速微调模块对抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整,并在初始化到达指定状态时切除箝位电源并与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环,启动混合仿真。快速微调方法包括:

[0139] a、电磁直流模型在箝位电源支撑下先启动运行并初步进入稳态,此时混合仿真接口不投入,混合仿真中机电侧网络不参与计算;

[0140] b、基于快速微调模块对换流变抽头位置进行微调,具体分整流侧和逆变侧分别进行。

[0141] 第1步,微调逆变侧换流变抽头,两极分别进行,以极1为例,测量逆变侧直流电压记为 $U_{dc\_Ip1m}$ ,从初始化信息元件获取潮流计算结果 $U_{dc\_Ip1}$ ,当 $(U_{dc\_Ip1m} - U_{dc\_Ip1}) / U_{dc\_Ip1} > Tap_{step} / 2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;当 $(U_{dc\_Ip1m} - U_{dc\_Ip1}) / U_{dc\_Ip1} < Tap_{step} / 2$ ,则逆变站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则下调1档,在副边则上调1档。

[0142] 第2步,微调整流侧换流变抽头,两极分别进行,以极1为例,测量整流侧实际触发角记为 $\alpha_{m\_Rp1}$ ,从初始化信息元件获取潮流计算结果 $Alpha\_Rp1$ ,当 $\alpha_{m\_Rp1} - Alpha\_Rp1 > 2.5^\circ$ ,则整流站该极换流变抽头进行调整,抽头在原边则上调1档,在副边则下调1档;当

$\alpha_{mRp1}-\text{Alpha}_{Rp1} < -2.5^\circ$ , 则整流站该极换流变抽头进行调整, 抽头在原边则下调1档, 在副边则上调1档。

[0143] c、基于快速微调模块对滤波器投切进行跟踪调整, 整流侧和逆变侧调整方法相同, 实测直流换流站流向交流系统的无功功率, 并与潮流结果对比, 若偏差量为正且大于半组滤波器容量 $Q_k/2$ , 则通过投切顺序逻辑再投一组滤波器; 若偏差量为负且小于半组滤波器容量 $Q_k/2$ , 则通过投切顺序逻辑再切一组滤波器。

[0144] 上述过程完成后, 投入混合仿真接口, 混合仿真中机电侧网络参与计算并通过接口与电磁直流模型形成仿真闭环, 此时通过开关元件切除箝位电源。

[0145] 经过上述步骤, 电磁直流模型将实现出试运行工况的自动调整, 在效果演示案例中, 电磁直流模型计算后0.6s即能达到指定的稳定运行工况, 且与潮流计算结果相比误差很小, 效果如图5所示。

[0146] 基于上述发明构思, 本实施例中还提供了一种基于混合仿真的电磁直流模型自动调整系统, 包括:

[0147] 获取模块, 用于从电磁侧潮流数据中获取初始运行工况信息, 为预先建立的电磁直流模型的初始化信息元件赋初始值;

[0148] 调整模块, 用于基于初始运行工况信息中各个信息元件的控制过程参数调整电磁直流模型当前运行状态;

[0149] 混合仿真模块, 用于当调整后的当前运行状态数据与电磁侧潮流数据达到一致时, 切除换流母线上的箝位电源, 使得电磁直流模型与机电侧电网通过混合仿真接口形成闭环, 启动混合仿真。

[0150] 其中, 调整模块还包括:

[0151] 自动初始化模块, 用于对换流母线上的箝位电源、电磁直流模型的初始运行方式、控制指令、换流变抽头档位和各组滤波器投切状态进行初始化处理;

[0152] 跟踪调整模块, 用于对换流变抽头位置和滤波器投切进行跟踪调整。

[0153] 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。

[0154] 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。

[0155] 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。

[0156] 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。

[0157] 最后应当说明的是:以上实施例仅用以说明本申请的技术方案而非对其保护范围的限制,尽管参照上述实施例对本申请进行了详细的说明,所属领域的普通技术人员应当理解:本领域技术人员阅读本申请后依然可对申请的具体实施方式进行种种变更、修改或者等同替换,这些变更、修改或者等同替换,其均在其申请待批的权利要求范围之内。

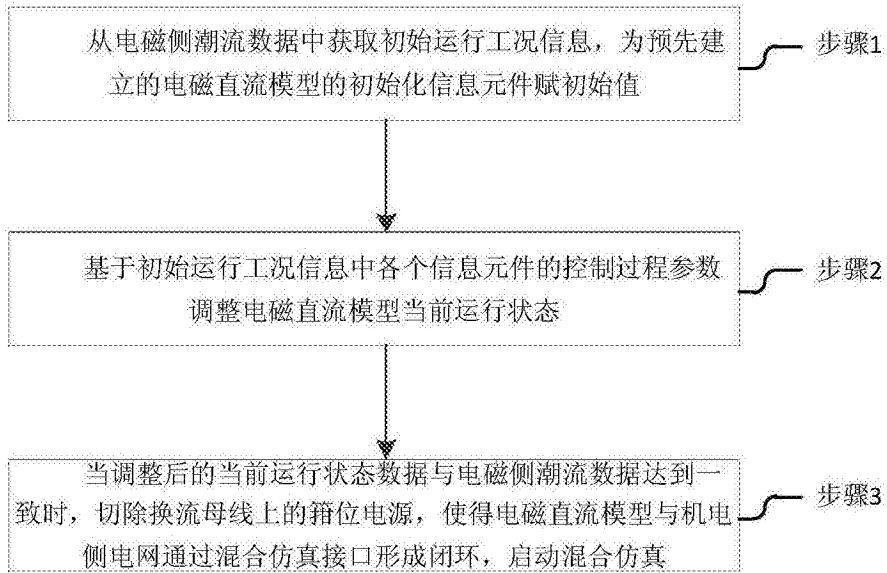


图1



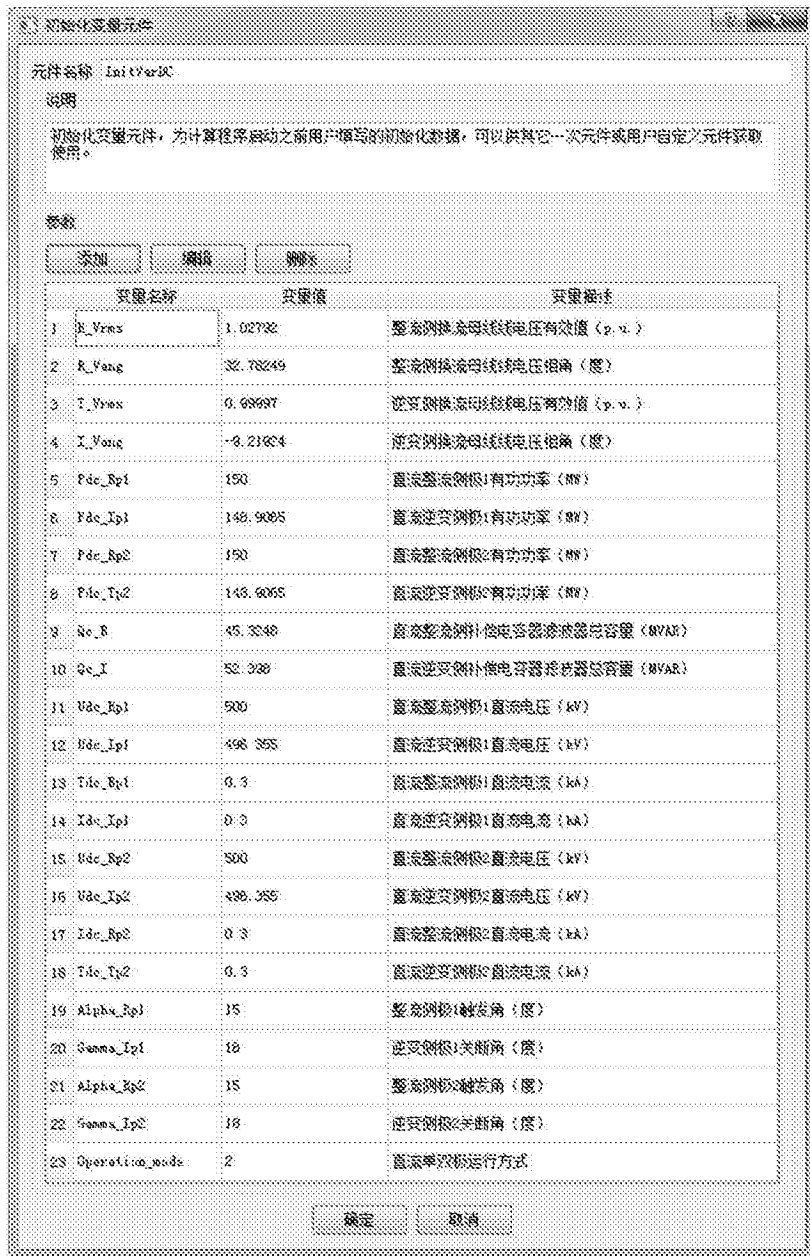


图2

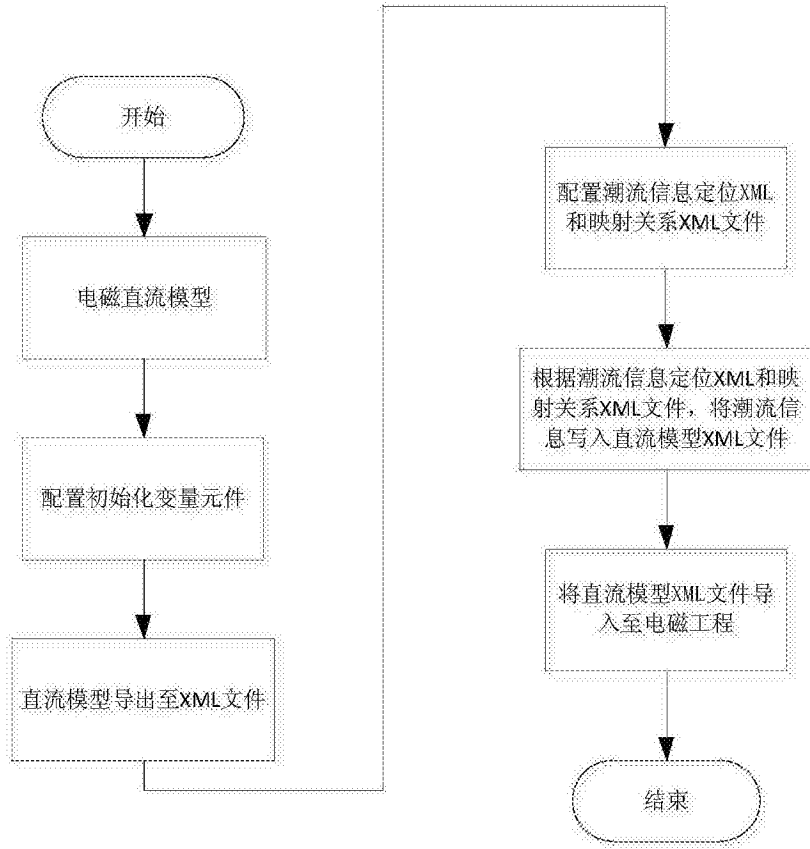


图3

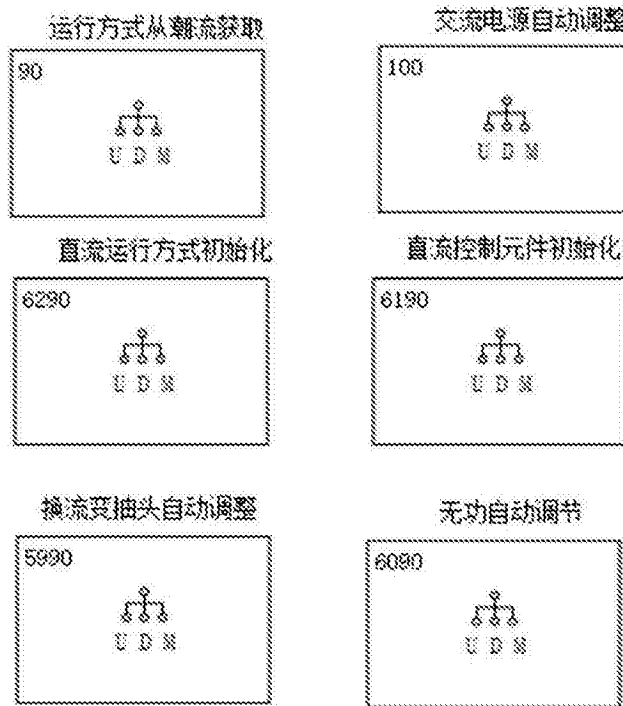
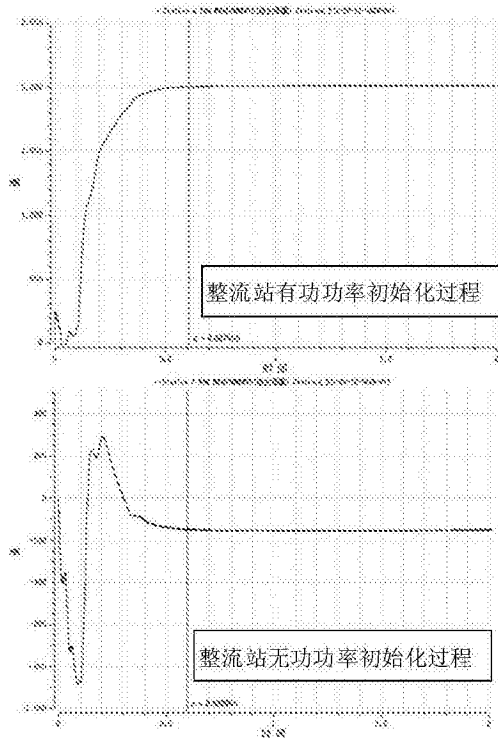


图4



0.6s的仿真过程即到达指定稳态

内容	潮流计算结果	电磁稳态统计	绝对误差	相对误差(相 比额定值)
整流站流入有功(MW)	2000	2007	7	0.23%
整流站流入无功(MW)	-167	-151	16	7
逆变站流出有功(MW)	1902.8	1875.8	-27	-0.9%
逆变站流出无功(MW)	205	268	55	7
整流侧直流电压(kV)	500	500	0.0	0.00%
逆变侧直流电压(kV)	475.7	473	-2.7	-0.54%
整流侧直流电流(kA)	2	2	0	0
逆变侧直流电流(kA)	2	1.996	-0.004	-0.2%
整流侧触发角(°)	15	14.5	-0.5	7
逆变侧关断角(°)	18	18.6	0.6	7

电磁直流模型初始化结果与潮流的误差对比

图5