



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105610151 A

(43) 申请公布日 2016. 05. 25

(21) 申请号 201510919842. 1

H02J 3/36(2006. 01)

(22) 申请日 2015. 12. 14

(71) 申请人 中国电力科学研究院

地址 100192 北京市海淀区清河小营东路  
15号

申请人 国家电网公司

(72) 发明人 贾俊川 屠竞哲 于强 云雷

易俊 张健 刘明松 曾兵

刘丽平 罗煦之 马士聪 王歆

(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

(51) Int. Cl.

H02J 3/00(2006. 01)

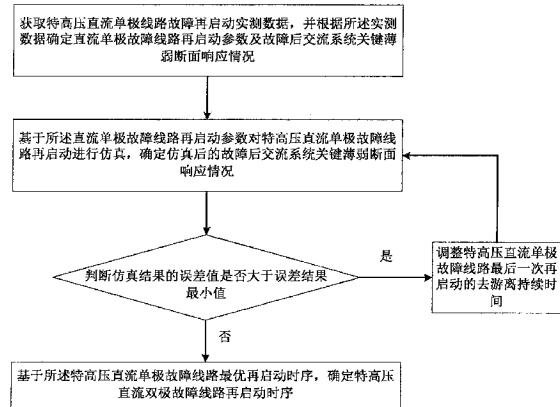
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

一种特高压直流再启动仿真优化方法

(57) 摘要

本发明涉及一种特高压直流再启动仿真优化方法,包括:获取特高压直流单极线路故障再启动实测数据,确定直流单极故障线路再启动参数及故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;基于直流单极故障线路再启动参数对特高压直流单极故障线路再启动进行仿真,确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;判断仿真结果的误差值是否大于误差结果最小值;基于特高压直流单极故障线路最优再启动时序,确定特高压直流双极故障线路再启动时序;本发明提供的方法能够准确模拟特高压直流故障后再启动时序及特高压直流单/双极再启动对交流系统的冲击特性,计算过程简便,结果准确,可用于特高压直流单/双极再启动策略的制定及交直流混联电网安全稳定分析。



1. 一种特高压直流再启动仿真优化方法,其特征在于,包括步骤:

(1) 获取特高压直流单极线路故障再启动实测数据,并根据所述实测数据确定直流单极故障线路再启动参数及故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;

(2) 基于所述直流单极故障线路再启动参数对特高压直流单极故障线路再启动进行仿真,确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;

(3) 判断仿真结果的误差值是否大于误差结果最小值,若是,则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间并返回步骤(2),直至仿真结果的误差值小于误差结果最小值并获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序;若否,则执行步骤(4),获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序;

(4) 基于所述特高压直流单极故障线路最优再启动时序,确定特高压直流双极故障线路再启动时序。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤(1)中,所述直流单极故障线路再启动参数包括:重启电压、重启次数、去游离持续时间、低压保护持续时间、直流重启时功率爬坡持续时间和重启失败后闭锁时间。

3. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤(1)中,确定实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况的公式为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{i\max} - P_0 \\ \Delta P_j = P_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta P_i$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量, $P_{i\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $\Delta P_j$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量, $P_{j\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率。

4. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤(2)中,确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况,公式为:

$$\begin{cases} \Delta P'_i = P'_{i\max} - P_0 \\ \Delta P'_j = P'_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta P'_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量, $P'_{i\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $\Delta P'_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量, $P'_{j\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率;

确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况与实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况的误差值,公式为:

$$\begin{cases} \delta_i = (\Delta P'_i - \Delta P_i) / P_0 \\ \delta_j = (\Delta P'_j - \Delta P_j) / P_0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $\delta_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P_i$ 的误差值,  $\delta_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P'_j$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P_j$ 的误差值。

5. 如权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述步骤(3)中, 设置误差结果最小值 $\xi$ , 分别判断仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P_i$ 的误差值 $\delta_i$ 和仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P'_j$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P_j$ 的误差值 $\delta_j$ 是否大于误差结果最小值 $\xi$ ;

若否, 则获取特高压直流单极故障线路当前再启动时序;

若是, 则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间, 直至 $\delta_i \leq \xi$ 或 $\delta_j \leq \xi$ , 并获取修改后的特高压直流单极故障线路再启动时序。

6. 如权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述步骤(4)中, 若交流系统允许特高压直流双极故障线路同时再启动, 则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路再启动时序。

7. 如权利要求6所述的方法, 其特征在于, 若交流系统不允许特高压直流双极故障线路同时再启动, 则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路中先故障一极的再启动时序, 令第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中先故障一极的故障时刻至后故障一极直接闭锁时刻的时间段为  $\Delta T_i$ , 获取第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量, 其中,  $\Delta T_i = 0\text{ms}$ , 则第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量公式为:

$$\begin{cases} \Delta P_i^{(i)} = P_{i\max}^{(i)} - P_0 \\ \Delta P_j^{(i)} = P_{j\max}^{(i)} - P_0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $\Delta P_i^{(i)}$ 为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量,  $P_{i\max}^{(i)}$ 为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $\Delta P_j^{(i)}$ 为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量,  $P_{j\max}^{(i)}$ 为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率, 其中,  $i \in [1, n]$ ,  $n$ 为特高压直流双极故障线路再启动仿真总数;

若  $\Delta P_i^{(i)}$  或  $\Delta P_j^{(i)}$  为 n 次特高压直流双极故障线路再启动仿真中最大值, 则将  $\Delta T_i$  作为所述特高压直流双极故障线路中先故障一极的故障时刻至所述特高压直流双极故障线路中后故障一极直接闭锁时刻的时间段进行特高压直流双极故障线路再启动仿真。

## 一种特高压直流再启动仿真优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统运行与控制领域,具体涉及一种特高压直流再启动仿真优化方法。

### 背景技术

[0002] 特高压直流由于输电线路长、地理跨度大、沿线气候和地形复杂,直流线路极容易发生瞬时故障。为提高直流线路的运行可靠性,在极控系统中设置了直流线路故障再启动功能,可以完成直流线路瞬时故障后快速重启。然而,直流再启动功能在提高直流输电工程运行可靠性的同时,对系统稳定性却是不利的。一方面,直流线路故障再启动,无论成功与否,故障期间积累的能量冲击将给交流系统稳定性带来巨大威胁。另一方面,由于直流再启动期间一般不会触发安控动作,再启动过程直接影响直流线路故障再启动失败后安全稳定装置的动作时间,不同再启动策略下直流重启时序对电网冲击特性不同。为制定合理的特高压直流再启动策略并准确分析特高压直流再启动对互联电网的影响,需要尽量切合实际的直流再启动时序以及直流再启动策略。

[0003] 直流再启动时序主要包括两个阶段,即去游离阶段和直流功率爬坡阶段。目前,国内特高压直流功率爬坡速率并不掌握,其与直流功率控制器参数及直流运行状态有关,虽然成套设计书中有明确直流重启功率恢复速度,但实际运行工况下通常达不到设计要求,且可能远远慢于设计值,这将给大电网安全稳定分析带来一定困难。另外,直流再启动策略中尤其双极不同故障时序的配合对电网稳定性冲击程度不同,研究直流双极再启动策略及其对系统稳定性的影响需要特高压直流双极相继再启动最优且实用的时序。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术的不足,本发明提供一种特高压直流再启动仿真优化方法,本发明提供的方法能够较为准确模拟特高压直流故障后再启动时序及特高压直流单/双极再启动对交流系统的冲击特性,计算过程简便,结果准确。

[0005] 本发明的目的是采用下述技术方案实现的:

[0006] 一种特高压直流再启动仿真优化方法,其改进之处在于,包括:

[0007] (1)获取特高压直流单极线路故障再启动实测数据,并根据所述实测数据确定直流单极故障线路再启动参数及故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;

[0008] (2)基于所述直流单极故障线路再启动参数对特高压直流单极故障线路再启动进行仿真,确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况;

[0009] (3)判断仿真结果的误差值是否大于误差结果最小值,若是,则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间并返回步骤(2),直至仿真结果的误差值小于误差结果最小值并获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序,若否,则执行步骤(4),获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序;

[0010] (4)基于所述特高压直流单极故障线路最优再启动时序,确定特高压直流双极故

障线路再启动时序。

[0011] 优选的,所述步骤(1)中,所述直流单极故障线路再启动参数包括:重启电压、重启次数、去游离持续时间、低压保护持续时间、直流重启时功率爬坡持续时间和重启失败后闭锁时间。

[0012] 优选的,所述步骤(1)中,确定实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况,公式为:

$$[0013] \quad \begin{cases} \Delta P_i = P_{i\max} - P_0 \\ \Delta P_j = P_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (1)$$

[0014] 式(1)中, $\Delta P_i$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量, $P_{i\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $\Delta P_j$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量, $P_{j\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率。

[0015] 优选的,所述步骤(2)中,确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况,公式为:

$$[0016] \quad \begin{cases} \Delta P'_i = P'_{i\max} - P_0 \\ \Delta P'_j = P'_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (2)$$

[0017] 式(2)中, $\Delta P'_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量, $P'_{i\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $\Delta P'_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量, $P'_{j\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值, $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率;

[0018] 确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况与实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况的误差值,公式为:

$$[0019] \quad \begin{cases} \delta_i = (\Delta P'_i - \Delta P_i) / P_0 \\ \delta_j = (\Delta P'_j - \Delta P_j) / P_0 \end{cases} \quad (3)$$

[0020] 式(3)中, $\delta_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量 $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量 $\Delta P_i$ 的误差值, $\delta_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量 $\Delta P'_j$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量 $\Delta P_j$ 的误差值。

[0021] 优选的,所述步骤(3)中,设置误差结果最小值 $\xi$ ,分别判断仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量 $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量 $\Delta P_i$ 的误差值 $\delta_i$ 和仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断

面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P'_j$  与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P_j$  的误差值  $\delta_j$  是否大于误差结果最小值  $\xi$ ;

[0022] 若否,则获取特高压直流单极故障线路当前再启动时序;

[0023] 若是,则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间,直至  $\delta_i \leq \xi$  或  $\delta_j \leq \xi$ , 并获取修改后的特高压直流单极故障线路再启动时序。

[0024] 优选的,所述步骤(4)中,若交流系统允许特高压直流双极故障线路同时再启动,则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路再启动时序。

[0025] 进一步的,若交流系统不允许特高压直流双极故障线路同时再启动,则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路中先故障一极的再启动时序,令第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中先故障一极的故障时刻至后故障一极直接闭锁时刻的时间段为  $\Delta T_i$ , 获取第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量,其中,  $\Delta T_i = 0\text{ms}$ , 则第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量公式为:

$$[0026] \quad \begin{cases} \Delta P_i^{(i)} = P_{i\max}^{(i)} - P_0 \\ \Delta P_j^{(i)} = P_{j\max}^{(i)} - P_0 \end{cases} \quad (4)$$

[0027] 式(4)中,  $\Delta P_i^{(i)}$  为第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量,  $P_{i\max}^{(i)}$  为第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $\Delta P_j^{(i)}$  为第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量,  $P_{j\max}^{(i)}$  为第  $i$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $P_0$  为关键薄弱断面的初始有功功率,其中,  $i \in [1, n]$ ,  $n$  为特高压直流双极故障线路再启动仿真总数;

[0028] 若  $\Delta P_i^{(i)}$  或  $\Delta P_j^{(i)}$  为  $n$  次特高压直流双极故障线路再启动仿真中最大值,则将  $\Delta T_i$  作为所述特高压直流双极故障线路中先故障一极的故障时刻至所述特高压直流双极故障线路中后故障一极直接闭锁时刻的时间段进行特高压直流双极故障线路再启动仿真。

[0029] 与最接近的现有技术相比,本发明具有的有益效果:

[0030] 本发明提供了一种特高压直流再启动仿真优化方法,能够准确模拟特高压直流故障后单极再启动时序并据此分析直流再启动冲击下交流系统稳定特性,提出的双极相继故障后再启动实用时序可方便用于特高压直流双极再启动策略分析,计算过程简便,结论可靠,通过本发明提供的方法既可用于特高压直流单/双极再启动策略的制定,也可用于交直流混联电网安全稳定分析。

## 附图说明

[0031] 图1是本发明提供的一种特高压直流再启动仿真优化方法流程图；

[0032] 图2是本发明实施例中特高压直流单极故障线路再启动成功仿真结果示意图。

### 具体实施方式

[0033] 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。

[0034] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，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做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例，都属于本发明保护的范围。

[0035] 本发明提供了一种特高压直流再启动仿真优化方法，如图1所示，包括：

[0036] (1)获取特高压直流单极线路故障再启动实测数据，并根据所述实测数据确定直流单极故障线路再启动参数及故障后交流系统关键薄弱断面响应情况；

[0037] 其中，所述特高压直流单极线路故障再启动实测数据可以通过直流重启试验或故障后直流重启录波PMU中获取；

[0038] (2)基于所述直流单极故障线路再启动参数对特高压直流单极故障线路再启动进行仿真，确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况；

[0039] 其中，可以采用机电暂态程序对特高压直流单极故障线路再启动进行仿真；

[0040] (3)判断仿真结果的误差值是否大于误差结果最小值，若是，则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间并返回步骤(2)，直至仿真结果的误差值小于误差结果最小值并获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序，若否，则执行步骤(4)，获取特高压直流单极故障线路最优再启动时序；

[0041] (4)基于所述特高压直流单极故障线路最优再启动时序，确定特高压直流双极故障线路再启动时序。

[0042] 其中，所述步骤(1)中，所述直流单极故障线路再启动参数包括：重启电压、重启次数、去游离持续时间、低压保护持续时间、直流重启时功率爬坡持续时间和重启失败后闭锁时间。

[0043] 具体的，所述步骤(1)中，确定实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况，公式为：

$$[0044] \begin{cases} \Delta P_i = P_{i\max} - P_0 \\ \Delta P_j = P_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (1)$$

[0045] 式(1)中， $\Delta P_i$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量， $P_{i\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值， $\Delta P_j$ 为实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量， $P_{j\max}$ 为实测直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值， $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率。

[0046] 所述步骤(2)中，确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况，公式为：



$$[0047] \quad \begin{cases} \Delta P'_i = P'_{i\max} - P_0 \\ \Delta P'_j = P'_{j\max} - P_0 \end{cases} \quad (2)$$

[0048] 式(2)中,  $\Delta P'_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量,  $P'_{i\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $\Delta P'_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量,  $P'_{j\max}$ 为仿真过程中直流单极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $P_0$ 为关键薄弱断面的初始有功功率;

[0049] 确定仿真后的故障后交流系统关键薄弱断面响应情况与实测故障后交流系统关键薄弱断面响应情况的误差值, 公式为:

$$[0050] \quad \begin{cases} \delta_i = (\Delta P'_i - \Delta P_i) / P_0 \\ \delta_j = (\Delta P'_j - \Delta P_j) / P_0 \end{cases} \quad (3)$$

[0051] 式(3)中,  $\delta_i$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P_i$ 的误差值,  $\delta_j$ 为仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P'_j$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P_j$ 的误差值。

[0052] 所述步骤(3)中, 设置误差结果最小值 $\xi$ , 分别判断仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P'_i$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P_i$ 的误差值 $\delta_i$ 和仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P'_j$ 与实测特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量  $\Delta P_j$ 的误差值 $\delta_j$ 是否大于误差结果最小值 $\xi$ ;

[0053] 若否, 则获取特高压直流单极故障线路当前再启动时序;

[0054] 若是, 则调整特高压直流单极故障线路最后一次再启动的去游离持续时间, 直至  $\delta_i \leq \xi$  或  $\delta_j \leq \xi$ , 并获取修改后的特高压直流单极故障线路再启动时序。

[0055] 所述步骤(4)中, 若交流系统允许特高压直流双极故障线路同时再启动, 则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路再启动时序。

[0056] 若交流系统不允许特高压直流双极故障线路同时再启动, 则将步骤(3)中最优再启动时序作为特高压直流双极故障线路中先故障一极的再启动时序, 令第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中先故障一极的故障时刻至后故障一极直接闭锁时刻的时间段为  $\Delta T_i$ , 获取第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量, 其中,  $\Delta T_i = 0\text{ms}$ , 则第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功或再启动失败冲击下的功率波动量公式为:

$$[0057] \quad \begin{cases} \Delta P_i^{(i)} = P_{i_{\max}}^{(i)} - P_0 \\ \Delta P_j^{(i)} = P_{j_{\max}}^{(i)} - P_0 \end{cases} \quad (4)$$

[0058] 式(4)中,  $\Delta P_i^{(i)}$  为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量,  $P_{i_{\max}}^{(i)}$  为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动成功暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $\Delta P_j^{(i)}$  为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动失败冲击下的功率波动量,  $P_{j_{\max}}^{(i)}$  为第*i*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中直流双极故障线路再启动失败暂态过程中关键薄弱断面的有功功率最大值,  $P_0$  为关键薄弱断面的初始有功功率, 其中,  $i \in [1, n]$ ,  $n$  为特高压直流双极故障线路再启动仿真总数;

[0059] 若  $\Delta P_i^{(i)}$  或  $\Delta P_j^{(i)}$  为*n*次特高压直流双极故障线路再启动仿真中最大值, 则将  $\Delta T_i$  作为所述特高压直流双极故障线路中先故障一极的故障时刻至所述特高压直流双极故障线路中后故障一极直接闭锁时刻的时间段进行特高压直流双极故障线路再启动仿真。

[0060] 实施例:

[0061] 选择某大型水电基地某回特高压直流输电工程, 直流再启动实测数据选取该特高压直流投运以来运行中发生单极及双极相继线路短路故障导致的单极再启动及双极相继再启动故障数据。

[0062] 所测直流再启动参数为: 原压启动、再启动次数为2次、第1次去游离持续150ms、第2次去游离持续200ms、直流线路低压保护持续约150ms、直流功率爬坡时间约400ms、重启失败后闭锁时间可忽略。

[0063] 交流系统关键薄弱断面选择特高压直流送端系统并列区域互联联络线, 其初始运行功率为500MW, 利用上述公式(1)计算得到特高压直流单极再启动成功及失败故障冲击下的功率波动量  $\Delta P_i$ 、 $\Delta P_j$  分别为2830MW和3065MW。

[0064] 机电暂态程序采用中国电力科学研究院开发的PSD-BPA仿真软件, 其默认直流功率恢复时间约50ms, 仿真结果如图2所示, 利用上述公式(2)计算得到直流故障后关键薄弱交流断面的有功功率最大值为2288MW, 仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流单极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量  $\Delta P'_i$  为1788MW, 利用公式(3)计算得到直流再启动成功冲击下关键薄弱断面功率波动量误差值  $\delta_i$  为208.4%, 选择允许误差最小值  $\xi = 10\%$ , 由于  $|\delta_i| > \xi$ , 需修改第2次再启动成功前去游离持续时间, 最终迭代生成特高压直流单极再启动成功最佳时序: 第1次去游离150ms、线路低压保护时间150ms、第2次去游离时间为200ms+350ms。

[0065] 由于特高压直流双极同时再启动对交流系统冲击过大, 考虑交直流混联系统的安全运行稳定性, 不允许特高压直流双极同时再启动, 双极运行情况下只能采取双极相继再启动策略; 直流双极中先故障一极按照单极最优再启动成功时序重启, 第二极故障直接闭锁时刻距第一极故障时刻记为  $\Delta T$ , 利用公式(4)获取  $T_1$  时刻至  $T_5$  时刻内仿真过程中特高压直流送端交流电网并列运行薄弱断面在直流双极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量, 如表1所示, 其中,  $T_1 = 0$ ,  $T_2 = 150\text{ms}$ ,  $T_3 = 300\text{ms}$ ,  $T_4 = 450\text{ms}$ ,  $T_5 = 600\text{ms}$ ;

[0066] 表1直流双极故障线路再启动成功冲击下的功率波动量

[0067]

双极故障间隔/ms	0	150	300	450	600
功率最大值/MW	4490	4510	4512	4477	4350
波动量 $\Delta P$ /MW	3990	4010	4012	3977	3850

[0068]  $T_3$ 时刻对应的波动量最大,则特高压直流双极相继再启动成功最优时序为:第1极故障后按照单极最佳再启动时序重启成功,第2极于第1极故障后300ms闭锁。

[0069] 最后应当说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制,尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明,所属领域的普通技术人员应当理解:依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换,而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换,其均应涵盖在本发明的权利要求保护范围之内。

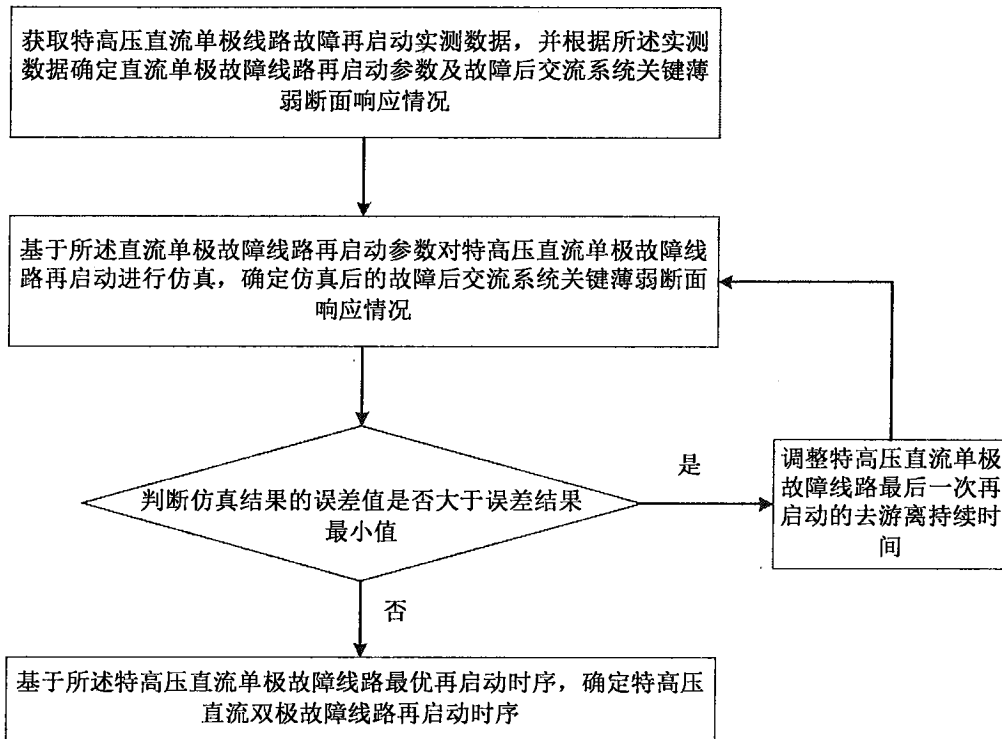


图1

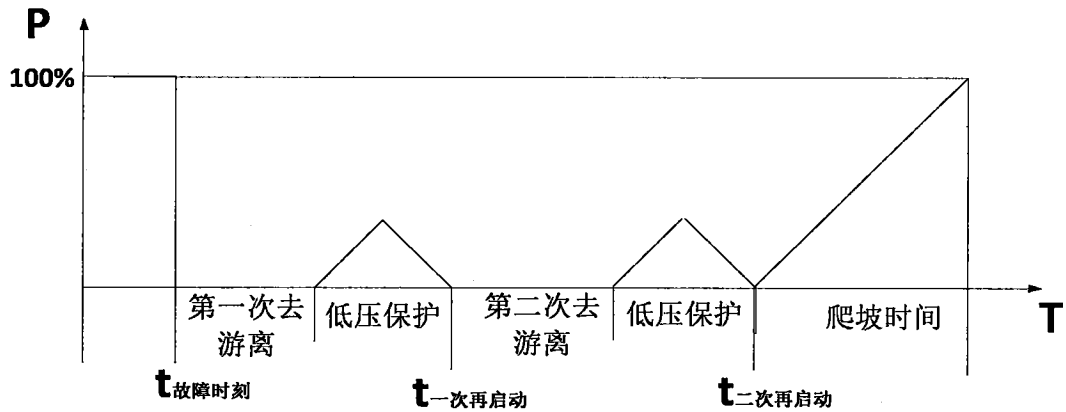


图2