



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115327272 B

(45) 授权公告日 2024. 10. 22

(21) 申请号 202210984714.5

(22) 申请日 2022.08.17

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115327272 A

(43) 申请公布日 2022.11.11

(73) 专利权人 国网经济技术研究院有限公司
地址 102209 北京市昌平区北七家未来科
技城北区国家电网公司办公区

(72) 发明人 马为民 李明 吴方劼 申笑林
王玲 徐莹 张涛 季一鸣
杜商安 王尧玄 王奥

(74) 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限
公司 11245
专利代理师 赵悦

(51) Int. Cl.

G01R 31/00 (2006.01)

G01R 31/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 108011384 A, 2018.05.08

CN 110943461 A, 2020.03.31

审查员 高文滔

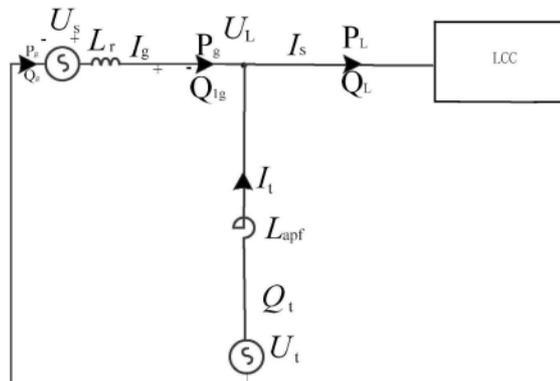
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法、
系统和可读介质

(57) 摘要

本发明属于输电系统技术领域,涉及一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法、系统和可读介质,包括以下步骤:根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;根据理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。其能够快速准确地计算出各个功率点的送受端直流电压电流、有功无功功率,分接开关档位以及SVG的无功出力等参数,为直流系统关键设备选型提供可靠的数据。



1. 一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,包括以下步骤:

根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;

根据所述理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算所述电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;

判断所述主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出所述计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

2. 如权利要求1所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,所述电路等效模型包括主回路和SVG支路,所述主回路包括第一交流信号源和换流变等效阻抗,所述第一交流信号源与换流变等效阻抗串联,所述换流变等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接;所述SVG支路包括第二交流信号源和连接电抗器电感,所述第二交流信号源与连接电抗器电感串联,所述连接电抗器电感的输出端与所述主回路连接。

3. 如权利要求2所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,所述电路简化等效模型包括第三交流信号源和换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗,所述第三交流信号源与所述换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗串联,所述换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接。

4. 如权利要求3所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,所述理想空载额定直流电压的计算方法为:

根据并网点电压参数的初始值,进行所述电路简化等效模型的主回路参数计算;

根据并网点电压参数的初始值,进行所述电路等效模型的主回路参数计算;

根据并网点电压参数的初始值,进行所述电路等效模型的SVG支路参数计算;

根据所述电路简化等效模型的主回路参数、电路等效模型的主回路参数和SVG支路参数通过迭代求解理想空载额定直流电压。

5. 如权利要求4所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,所述电路简化等效模型的主回路参数包括:换相角、无功消耗和传输电流;所述电路等效模型的主回路参数包括:换流变无功消耗、网侧电流和功率因数;所述电路等效模型的SVG支路参数包括:SVG的无功出力,连接电抗器的无功消耗,断开无功消耗和SVG电压源电压。

6. 如权利要求1-5任一项所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,所述电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数的计算方法为:设置多工况多功率下的功率步长以及各功率点的实际无功交换控制值,通过牛顿迭代计算条件约束下的多种工况下的直流系统运行特性,从而获得电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数。

7. 如权利要求6所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,在全压运行工况时,设置直流功率的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot L_{apf} - Q_{tli}$, $x = U_L$, 设置初始值,设置迭代步长,如果出现 $F(x_i) = 0$,则迭代结束,其中, i 代表第 N 个功率点, Q_t 为SVG无功出力, I_t 为SVG支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_L 为SVG并网点电压, ω 为交流电中的电角度。

8. 如权利要求6所述的SLCC换相技术的主回路参数计算方法,其特征在于,在降压运行工况时,设置降压系数 k ,设置直流功率从 $0.1-k$ 下的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot$

$L_{apf} - Q_{tli}$, 其中, i 代表第 N 个功率点, $x = U_t$, 设置初始值, 设置迭代步长, 如果出现 $F(x_1) = 0$, 则迭代结束, 其中, i 代表第 N 个功率点, Q_t 为 SVG 无功出力, I_t 为 SVG 支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_t 为 SVG 并网点电压, ω 为交流电中的电角度。

9. 一种 SLCC 换相技术的主回路参数计算系统, 其特征在于, 包括:

空载额定直流电压计算模块, 用于根据电路等效模型和电路简化等效模型, 通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;

主回路参数计算模块, 用于根据所述理想空载额定直流电压, 结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标, 计算所述电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;

输出模块, 用于判断所述主回路参数的计算结果是否在预设范围内, 若是则输出所述计算结果, 若否则修改参数后, 重新进行上述步骤, 直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

10. 一种计算机可读存储介质, 其特征在于, 所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序, 所述计算机程序被处理器执行以实现如权利要求 1-8 任一项所述的 SLCC 换相技术的主回路参数计算方法。

一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法、系统和可读介质

技术领域

[0001] 本发明涉及一种SLCC(Statcom and line commutation converter)换相技术的主回路参数计算方法、系统和可读介质,属于输电系统技术领域。

背景技术

[0002] 电网换相换流直流输电技术(LCC)是目前国网内应用最多的直流输电技术形式,在远距离、大容量输电领域中起着不可替代的作用。但由于LCC直流输电技术采用晶闸管作为换流器件,仍存在着以下本质缺陷:(1)依赖换相电压,在弱系统下难以稳定运行;(2)需要较大的换相角,消耗大量无功功率,需要投入大量无功补偿设备;(3)无功设备断路器投切速度慢,发生故障时无法配合直流系统晶闸管触发角控制进行灵活配合,导致交流系统无功过剩过电压;(4)存在换相失败风险,针对当前多回直流汇集馈入同一交流电网网架结构,各直流间相互耦合,可导致多条直流换相失败,扩大事故。

[0003] VSC技术即柔性直流输电技术,采用了由全控型电力电子器件构成的电压源型换流器,因此不仅能够独立地控制有功功率和无功功率的输出,而且可以向弱系统甚至无源系统供电,不需要配置无功补偿装置,输出电压的谐波小,无需站间通信,换流站占地面积以及电磁污染等与常规直流输电相比也大大减小。

[0004] SLCC换流器技术是新提出的一种具有复合电压源及电流源特征的换流技术,其拓扑结构如图1所示,能够实现了LCC和VSC性能优化升级。具体为:(1)利用电压源特性,减少对交流系统的依赖,提升动态无功特性,灵活适应新能源孤岛馈入,降低换相失败风险,同时有效避免交流电网谐波污染,大幅减轻设备应力,提升设备安全运行可靠性;(2)采用成熟的大容量电力电子器件,可靠性高、损耗小,容量规模不受限;(3)通过电压源和电流源的协调控制,有效降低了单一电压源换流器引起的振荡风险;(4)取消交流滤波器配置,大大减少换流站总占地面积。

[0005] 新型电力系统发展普遍存在的问题包括风电和光伏发电的随机性和波动性大,系统惯量小,新能源难以向系统提供无功支撑等,传统直流输电系统面临严峻挑战,SLCC作为一种新型直流换相技术,能够具有更高的适应性,将引领直流技术实现新升级。

[0006] 作为一种新技术,该拓扑结构形式结合了全控和半控型器件的各自特点,在控制策略、仿真模型搭建等方面相对以往LCC和VSC直流输电技术来说更加复杂和困难,但所有的基础都是首先求解完善的系统参数。常规的LCC主回路参数计算方法由于各变量之间未存在相互耦合,通常是根据直流电压和直流目标电流求解换流器理想控制直流电压 U_{di0} 、换相角、无功消耗等参数。而SLCC换流器技术主回路参数计算由于含有两条支路,其中阀侧电压、阀侧电流、SVG支路电流、SVG支路电压、SVG无功出力等多个参数之间相互深度耦合,计算求解难度非常大,而主回路参数的求解是十分关键的,其直接影响换流变参数选型以及后续其他一次设备的计算。

发明内容

[0007] 针对上述问题,本发明的目的是提供了一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法、系统和可读介质,其能够快速准确地计算出各个功率点的送受端直流电压电流、有功无功功率,分接开关档位以及SVG的无功出力等参数,为直流系统关键设备选型提供可靠的数据。

[0008] 为实现上述目的,本发明提出了以下技术方案:一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法,包括以下步骤:根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;根据理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

[0009] 进一步,电路等效模型包括主回路和SVG支路,主回路包括第一交流信号源和换流变等效阻抗,第一交流信号源与换流变等效阻抗串联,换流变等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接;SVG支路包括第二交流信号源和连接电抗器电感,第二交流信号源与连接电抗器电感串联,连接电抗器电感的输出端与主回路连接。

[0010] 进一步,电路简化等效模型包括第三交流信号源和换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗,第三交流信号源与换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗串联,换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接。

[0011] 进一步,理想空载额定直流电压的计算方法为:根据并网点电压参数的初始值,进行电路简化等效模型的主回路参数;根据并网点电压参数的初始值,进行电路等效模型的主回路参数;根据并网点电压参数的初始值,进行电路等效模型的SVG支路参数;根据电路简化等效模型的主回路参数、电路等效模型的主回路参数和SVG支路参数通过迭代求解理想空载额定直流电压。

[0012] 进一步,电路简化等效模型的主回路参数包括:换相角、无功消耗和传输电流;电路等效模型的主回路参数包括:换流变无功消耗、网侧电流和功率因数;电路等效模型的SVG支路参数包括:SVG的无功出力,连接电抗器的无功消耗,断开无功消耗和SVG电压源电压。

[0013] 进一步,电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数的计算方法为:设置多工况多功率下的功率步长以及各功率点的实际无功交换控制值,通过牛顿迭代计算条件约束下的多种工况下的直流系统运行特性,从而获得电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数。

[0014] 进一步,在全压运行工况时,设置直流功率的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot L_{apf} - Q_{tli}$, $x = U_L$, 设置初始值,设置迭代步长,如果出现 $F(x_1) = 0$,则迭代结束,其中, i 代表第 N 个功率点, Q_t 为SVG无功出力, I_t 为SVG支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_L 为SVG并网点电压。

[0015] 进一步,在降压运行工况时,设置降压系数 k ,设置直流功率从 $0.1-k$ 下的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot L_{apf} - Q_{tli}$,其中, i 代表第 N 个功率点, $x = U_L$,设置初始值,设置迭

代步长,如果出现 $F(x_i) = 0$,则迭代结束,其中, i 代表第 N 个功率点, Q_t 为SVG无功出力, I_t 为SVG支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_t 为SVG并网点电压。

[0016] 本发明还公开了一种SLCC换相技术的主回路参数计算系统,包括:空载额定直流电压计算模块,用于根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;主回路参数计算模块,用于根据理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;输出模块,用于判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

[0017] 本发明还公开了一种计算机可读存储介质,计算机可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行以实现上述任一项的SLCC换相技术的主回路参数计算方法。

[0018] 本发明由于采取以上技术方案,其具有以下优点:

[0019] 1、本发明能够快速准确地计算出各个功率点的送受端直流电压电流、有功无功功率,分接开关档位以及SVG的无功出力等参数,为直流系统关键设备选型提供可靠的数据。

[0020] 2、本发明克服了传统LCC直流输电技术的系列技术缺陷,解决了对交流系统依赖程度高,在大规模新能源汇集场景下适应性差的问题,能有效抑制送端过电压、受端低电压的问题,并降低换相失败的风险;避免谐波流入交流系统引起的电能质量污染和振荡;大幅减少有载分接开关频繁动作及滤波器反复投切引起的设备安全风险。

附图说明

[0021] 图1是现有技术中SLCC换相换流阀的结构示意图;

[0022] 图2是本发明一实施例中SLCC换相换流阀电路等效模型的结构示意图;

[0023] 图3是本发明另一实施例中SLCC换相换流阀电路简化等效模型的结构示意图。

具体实施方式

[0024] 为了使本领域技术人员更好的理解本发明的技术方案,通过具体实施例对本发明进行详细的描绘。然而应当理解,具体实施方式的提供仅为了更好地理解本发明,它们不应该理解成对本发明的限制。在本发明的描述中,需要理解的是,所用到的术语仅仅是用于描述的目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0025] 现有技术中传统LCC直流输电技术的对交流系统依赖程度高,在大规模新能源汇集场景下适应性差的问题,本发明提出了一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法、系统和可读介质,其根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。本发明方案能有效抑制送端过电压、受端低电压的问题,并降低换相失败的风险;避免谐波流入交流系统引起的电能质量污染和振荡;大幅减少有载分接开关频繁动作及滤波器反复投切引起的设备安全风险。下面结合附图,通过实施例对本发明方案进行详细说明。

[0026] 实施例一

[0027] 本实施例公开了一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法,包括以下步骤:

[0028] S1根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;

[0029] 电路等效模型如图2所示,定义电流正方向为交流系统流向直流系统。电路等效模型包括主回路和SVG支路,主回路包括第一交流信号源和换流变等效阻抗,第一交流信号源与换流变等效阻抗串联,换流变等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接;SVG支路包括第二交流信号源和连接电抗器电感,第二交流信号源与连接电抗器电感串联,连接电抗器电感的输出端与主回路连接。其中,主回路中 U_s 为送端交流系统传输的电压; I_g 为网侧电流; P_g 为换流变阀侧传输的有功功率; L_r 为换流变等效阻抗; Q_{1g} 为换流变阀侧传输的无功功率; U_L 为SVG并网点电压; I_s 为换流变阀侧电流; P_L 和 Q_L 分别为流入LCC换流阀的有功和无功功率。SVG支路中, I_t 为支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感; Q_t 为SVG无功出力, U_t 为SVG等效电压。

[0030] 如图3所示,电路简化等效模型包括第三交流信号源和换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗,第三交流信号源与换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗串联,换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗的输出端与LCC换流阀连接。

[0031] 电路简化等效模型如图2所示,其中, U_s 、 P_s 、 Q_s 分别为送端交流系统传输的电压、有功和无功功率, L_x 为换流变与SVG连接阻抗的合成等效阻抗。 I_s 为换流变阀侧电流; U_L 为SVG并网点电压; P_L 和 Q_L 分别为流入LCC换流阀的有功和无功功率。同样的等效模型适用于受端。仅在下面中增加R和I分别代表送端和受端。

[0032] 理想空载额定直流电压的计算方法为:

[0033] S1.1设置并网点电压 U_L 参数的初始值,根据已知的直流系统的有功功率、无功功率、直流电压、直流电流、换流变等值阻抗,利用牛顿迭代计算换流站额定理想空载直流电压 U_{di0N} 。

[0034] S1.2根据并网点电压参数的初始值,进行电路简化等效模型的主回路参数;电路简化等效模型的主回路参数包括:换相角、无功消耗和传输电流。

[0035] 等值阻抗 L_x 计算公式为:

$$[0036] \quad L_x = \frac{L_r \cdot L_{apf}}{L_r + L_{apf}} \quad (1)$$

[0037] 直流系统理想空载电压 U_{di02} 计算公式为

$$[0038] \quad U_{di02} = \frac{\frac{U_d + U_T + I_d \cdot L_x \cdot \omega \cdot 3 / \pi}{2n}}{\cos \alpha} \quad (2)$$

[0039] 其中,n为12脉动个数。

[0040] 换相角 μ 计算

$$[0041] \quad \mu = \arccos(\cos \alpha - 6 \cdot 100 \cdot L_x \cdot I_d / U_{di02}) - \alpha \quad (3)$$

[0042] 换流器装置整体无功消耗

$$[0043] \quad Q_L = 2 \cdot n \cdot I_d \cdot U_{di02} \cdot \frac{2\mu + \sin(2\alpha) - \sin(2\alpha + 2\mu)}{4[\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]} \quad (4)$$

[0044] 换流阀装置整体功率因数

$$[0045] \quad \phi_v = A \tan \left(\left(\frac{Q_s - 3/2 \cdot \omega \cdot L_x \cdot I_s \cdot I_s}{P_L} \right) \right) \quad (5)$$

[0046] 换流器阀侧电流 I_s

$$[0047] \quad I_s = P_s / \sqrt{3} / (U_{di02} \cdot \pi / 3 / \sqrt{2}) / \cos \phi_v \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

[0048] S1.3根据并网点电压参数的初始值,进行电路等效模型的主回路参数;电路等效模型的主回路参数包括:换流变无功消耗、网侧电流和功率因数;

[0049] 换流变流过电流 I_g

$$[0050] \quad (P_s + Q_s)^2 + (Q_s - 3/2 \cdot L_r \cdot I_g)^2 = (3/2 \cdot U_L \cdot I_g)^2$$

[0051] 换流变支路功率因数

$$[0052] \quad \theta_{vgvi} = \arctan(Q_g/P_g)$$

[0053] 换流变支路电流相位

$$[0054] \quad \theta_{ig} = \theta_{vg} - \theta_{vgvi}$$

[0055] θ_{vg} 为阀侧电压相角,以网侧线电压角度为0作为起始角度。同样计算出换流变阻抗的无功消耗:

$$[0056] \quad Q_{-Lg} = 3 \cdot \omega \cdot L_r \cdot I_g \cdot I_g / 2$$

[0057] 经过换流变阻抗的无功功率

$$[0058] \quad Q_{Lg} = Q_g - Q_{-Lg}$$

[0059] 换流变支路并网点功率因数

$$[0060] \quad \theta_{VLvi} = \arctan \left(\frac{Q_{Lg}}{P_g} \right)$$

[0061] 换流变支路并网点电压相角

$$[0062] \quad \theta_{VL} = \theta_{VLvi} + \theta_{ig}$$

[0063] S1.4根据并网点电压参数的初始值,进行电路等效模型的SVG支路参数;电路等效模型的SVG支路包括:SVG的无功出力,连接电抗器的无功消耗,断开无功消耗和SVG电压源电压。

[0064] SVG支路的电流相位

$$[0065] \quad \theta_{is} = \theta_{VL} - \arctan(Q_L/P_s)$$

[0066] SVG等效电压源的电压相位

$$[0067] \quad \theta_{vs} = \theta_{is} + \arctan(Q_s/P_s) \quad (8)$$

[0068] SVG等效电压源的电压幅值

$$[0069] \quad U_t = \sqrt{\left(((L_{apf} + L_r) \cdot U_s \cdot \cos \theta_{vs} - L_{apf} \cdot V_g \cdot \cos \theta_{vg}) / L_r \right)^2 + \left(((L_{apf} + L_r) \cdot U_s \cdot \sin \theta_{vs} - L_{apf} \cdot V_g \cdot \sin \theta_{vg}) / L_r \right)^2} \quad (9)$$

[0070] SVG支路的电流幅值

$$[0071] \quad I_t = \sqrt{\left((U_t \cdot \sin(\theta_{vt}) - U_L \cdot \sin(\theta_{vL})) / (\omega L_{apf}) / \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \right)^2 + \left((-U_t \cdot \cos(\theta_{vL}) + U_L \cdot \cos(\theta_{vL})) / (\omega L_{apf}) / \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \right)^2} \quad (10)$$

[0072] SVG支路出口无功出力

$$[0073] \quad Q_t = Q_g - (Q_{Lg} - Q_L) \quad (11)$$

[0074] SVG电压源无功出力

$$[0075] \quad Q_{t1} = \sqrt{3}V_t \cdot I_t \cdot \sin(\text{atan}(Q_t / (P_g - P_s))) \quad (12)$$

[0076] S1.5根据电路简化等效模型的主回路参数、电路等效模型的主回路参数和SVG支路参数通过迭代求解理想空载额定直流电压。

[0077] S2根据理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;

[0078] 电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数的计算方法为:设置多工况多功率下的功率步长以及各功率点的实际无功交换控制值,通过牛顿迭代计算条件约束下的多种工况下的直流系统运行特性,从而获得电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数。

[0079] 在全压运行工况时,设置直流功率从0.1-1.0pu下的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot L_{apf} - Q_{t1i}$, $x = U_L$,设置初始值,设置迭代步长,如果出现 $F(x_1) = 0$,则迭代结束,返回运行特性各参数。其中,i代表第N个功率点, Q_t 为SVG无功出力, I_t 为SVG支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_L 为SVG并网点电压。

[0080] 在降压运行工况时,设置降压系数 $k = 0.7, 0.8, 0.9$ 等 $[0.5, 1.0]$ 区间的数,设置直流功率从0.1-k下的无功交换控制值,逐一进行各个功率点的稳态参数计算,在稳态参数计算过程中,采用牛顿拉夫逊法,令 $F(x) = Q_{ti} - 3I_{ti}^2 \cdot \omega \cdot L_{apf} - Q_{t1i}$,其中,i代表第N个功率点, $x = U_L$,设置初始值,设置迭代步长,如果出现 $F(x_1) = 0$,则迭代结束,其中,i代表第N个功率点, Q_t 为SVG无功出力, I_t 为SVG支路电流, L_{apf} 为连接电抗器电感, U_L 为SVG并网点电压。

[0081] 当第i个工况下的第j个功率点上述计算流程完成后,则进行下个功率点的运行特性计算,当所有功率点的换流器参数理想控制电压、换流变分接头位置均完成后,进行第i+1个功率的计算,当所有结果均计算完成后,保存计算结果,并退出运行。

[0082] S3判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

[0083] 本实施例提供了一种SLCC换相技术的主回路参数计算方法,用于指导实际直流输电工程的成套化设计和系统运行及控制设定,特别是为未来大规模新能源接入背景下的直流输电系统的换流变设计、交直流滤波器设计等提供稳态运行参数。

[0084] 实施例二

[0085] 基于相同的方面构思,本实施例通过一个具体实例对实施例一中方案进行进一步说明,本实施例中以国内 $\pm 800\text{kV}$ 工程为例进行SLCC-HVDC换相技术设计,系统额定电压为 800kV ,单极输送功率为 4000MW ,额定触发角及额定关断角分别为 15° 、 17° 、触发角的范围为 $[12.5^\circ, 17.5^\circ]$,最小触发角为 5° ,最小关断角为 12° 。直流额定电阻 $R = 9.65\Omega$,本文将对该工程送受端主回路参数进行计算。

[0086] 送受端SVG均选取交流系统无功交换结零作为控制目标,此时计算双极全压运行方式、单极大地、单极金属运行工况下各换流站功率同步从0.1pu增加至1.2pu情况下的主回路参数,各换流站的直流功率、直流电压、直流电流、空载直流电压、触发角/关断角、换相角、换流器消耗有功功率、换流变分接头位置结果如下表1-表3所示。

[0087] 表1双极全压下主回路运行特性表

Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi0R (kV)	Udi0I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
0.1	0.50	800	207.72	207.85	208.29	208.42	800	15	17	0	-4
0.2	1.00	800	208.03	206.87	209.21	208.01	1600	15	17	0	-4
0.3	1.50	800	208.23	205.81	210.14	207.61	2400	15	17	-1	-4
0.4	2.00	800	209.33	204.68	211.06	207.20	3200	15	17	-1	-3
0.5	2.50	800	208.31	203.47	211.99	206.80	4000	15	17	-1	-3
0.6	3.00	800	208.21	202.19	212.91	206.39	4800	15	17	-1	-2
0.7	3.50	800	208.00	200.83	213.84	205.98	5600	15	17	0	-2
0.8	4.00	800	207.70	199.40	214.76	205.58	6400	15	17	0	-1
0.9	4.50	800	207.29	197.89	215.68	205.17	7200	15	17	0	-1
1	5.00	800	206.76	196.29	216.61	204.77	8000	15	17	0	0
1.1	5.53	796.3	205.10	193.52	216.61	203.37	8800	15	17	1	1
1.2	6.06	792.5	203.29	190.62	216.61	201.95	9600	15	17	1	2

[0088]

表2 单极大地主回路运行特性表

Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi01R (kV)	Udi01I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
0.1	0.50	800	207.72	207.32	208.29	207.89	400	15	17	0	-4
0.2	1.00	800	208.03	205.81	209.21	206.96	800	15	17	0	-4
0.3	1.50	800	208.23	204.23	210.14	206.02	1200	15	17	-1	-3
0.4	2.00	800	209.33	202.56	211.06	205.09	1600	15	17	-1	-2
0.5	2.50	800	208.31	200.82	211.99	204.16	2000	15	17	-1	-2
0.6	3.00	800	208.21	199.00	212.91	203.22	2400	15	17	-1	-1
0.7	3.50	800	208.00	197.10	213.84	202.29	2800	15	17	0	0
0.8	4.00	800	207.70	195.13	214.76	201.35	3200	15	17	0	0
0.9	4.50	800	207.29	193.06	215.68	200.42	3600	15	17	0	1
1	5.00	800	206.76	190.91	216.61	199.49	4000	15	17	0	2
1.1	5.53	796.3	205.10	187.54	216.61	197.53	4400	15	17	1	4
1.2	6.06	792.5	203.29	184.03	216.61	195.55	4800	15	17	1	5

[0089]

表3单极金属主回路运行特性表

Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi01R (kV)	Udi01I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
0.1	0.50	800	207.72	206.59	208.29	207.16	400	15	17	0	-4
0.2	1.00	800	208.03	204.34	209.21	205.49	800	15	17	0	-3
0.3	1.50	800	208.23	202.02	210.14	203.82	1200	15	17	-1	-2
0.4	2.00	800	209.33	199.62	211.06	202.16	1600	15	17	-1	-1
0.5	2.50	800	208.31	197.13	211.99	200.49	2000	15	17	-1	0
0.6	3.00	800	208.21	194.57	212.91	198.82	2400	15	17	-1	1
0.7	3.50	800	208.00	191.92	213.84	197.15	2800	15	17	0	2
0.8	4.00	800	207.70	189.19	214.76	195.49	3200	15	17	0	3
0.9	4.50	800	207.29	186.36	215.68	193.82	3600	15	17	0	4
1	5.00	800	206.76	183.43	216.61	192.15	4000	15	17	0	6
1.1	5.53	796.3	205.10	179.22	216.61	189.42	4400	15	17	1	8
1.2	6.06	792.5	203.29	174.85	216.61	186.66	4800	15	17	1	10

[0090]

[0091] 送受端SVG均选取交流系统无功交换结零作为控制目标,设置降压系数 $k=0.8$,此时计算双极全压运行方式、单极大地、单极金属运行工况下各换流站功率同步从0.1pu增加至1.2pu情况下的主回路参数,各换流站的直流功率、直流电压、直流电流、空载直流电压、触发角/关断角、换相角、换流器消耗有功功率、换流变分接头位置结果如下表4-表6所示。

[0092] 表4双极大地主回路运行特性

	Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi01R (kV)	Udi01I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
[0093]	0.1	0.625	640	166.39	165.78	167.11	166.49	800	15	17	19	15
	0.2	1.25	640	166.66	164.48	168.27	165.98	1600	15	17	19	15
	0.3	1.875	640	166.73	163.02	169.42	165.48	2400	15	17	19	16
	0.4	2.5	640	165.60	161.42	170.58	164.97	3200	15	17	20	17
	0.5	3.125	640	166.27	159.68	171.73	164.46	4000	15	17	19	18
	0.6	3.75	640	165.75	157.77	172.89	163.95	4800	15	17	20	20
	0.7	4.375	640	165.01	155.71	174.04	163.45	5600	15	17	20	21
	0.8	5	640	164.05	153.48	175.20	162.94	6400	15	17	21	22

[0094] 表4单极大地主回路运行特性

	Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi01R (kV)	Udi01I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
[0095]	0.1	0.625	640	166.39	165.12	167.11	165.83	400	15	17	19	15
	0.2	1.25	640	166.66	163.15	168.27	164.66	800	15	17	19	16
	0.3	1.875	640	166.73	161.04	169.42	163.49	1200	15	17	19	18
	0.4	2.5	640	165.60	158.76	170.58	162.33	1600	15	17	20	19
	0.5	3.125	640	166.27	156.34	171.73	161.16	2000	15	17	19	20
	0.6	3.75	640	165.75	153.75	172.89	147.17	2400	15	17	20	22
	0.7	4.375	640	165.01	150.99	174.04	158.83	2800	15	17	20	24
	0.8	5	640	164.05	149.58	175.20	159.46	3200	15	19	21	25

[0096] 表5单极金属主回路运行特性

	Power (p.u.)	Current (kA)	UdR (kV)	Udi01R (kV)	Udi01I (kV)	Udi02R (kV)	Udi02I (kV)	PdR (MW)	α (°)	γ (°)	TCr	TCI
[0097]	0.1	0.625	640	166.39	164.21	167.11	164.91	400	15	17	19	16
	0.2	1.25	640	166.66	161.32	168.27	162.83	800	15	17	19	17
	0.3	1.875	640	166.73	158.27	169.42	160.75	1200	15	17	19	19
	0.4	2.5	640	165.60	155.07	170.58	158.66	1600	15	17	20	21
	0.5	3.125	640	166.27	151.70	171.73	156.58	2000	15	17	19	24
	0.6	3.75	640	165.75	149.60	172.89	156.26	2400	15	19.0	20	25
	0.7	4.375	640	165.01	149.60	174.04	158.34	2800	15	23.0	20	25
	0.8	5	640	164.05	149.60	175.20	160.63	3200	15	26.5	21	25

[0098] 实施例三

[0099] 基于相同的发明构思,本实施例公开了一种SLCC换相技术的主回路参数计算系统,包括:

[0100] 空载额定直流电压计算模块,用于根据电路等效模型和电路简化等效模型,通过牛顿拉夫逊迭代方法计算出理想空载额定直流电压;

[0101] 主回路参数计算模块,用于根据理想空载额定直流电压,结合交流系统无功功率控制目标和直流系统角度控制目标,计算电路等效模型和电路简化等效模型中主回路参数;

[0102] 输出模块,用于判断主回路参数的计算结果是否在预设范围内,若是则输出计算结果,若否则修改参数后,重新进行上述步骤,直至所有参数的计算结果都在预设范围内为止。

[0103] 实施例四

[0104] 基于相同的发明构思,本实施例公开了一种计算机可读存储介质,计算机可读存

储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行以实现上述任一项的SLCC换相技术的主回路参数计算方法。

[0105] 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。

[0106] 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。

[0107] 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。

[0108] 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。

[0109] 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。上述内容仅为本申请的具体实施方式,但本申请的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内,可轻易想到变化或替换,都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此,本申请的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

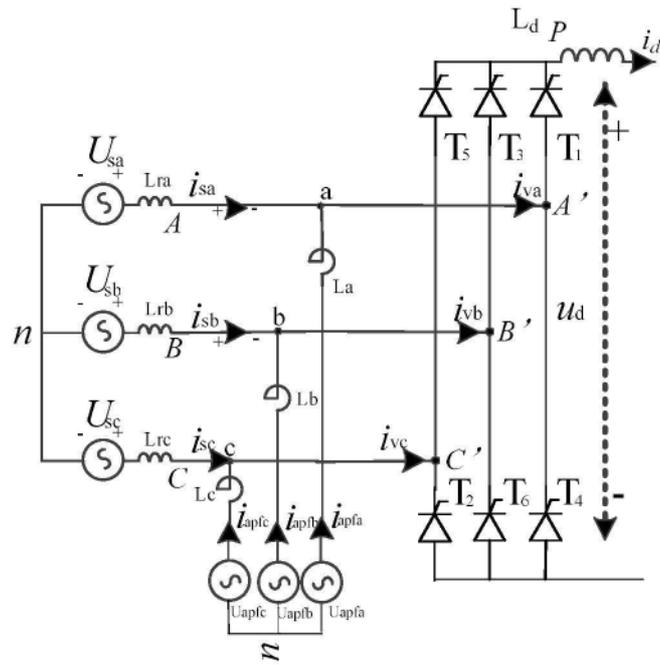


图1

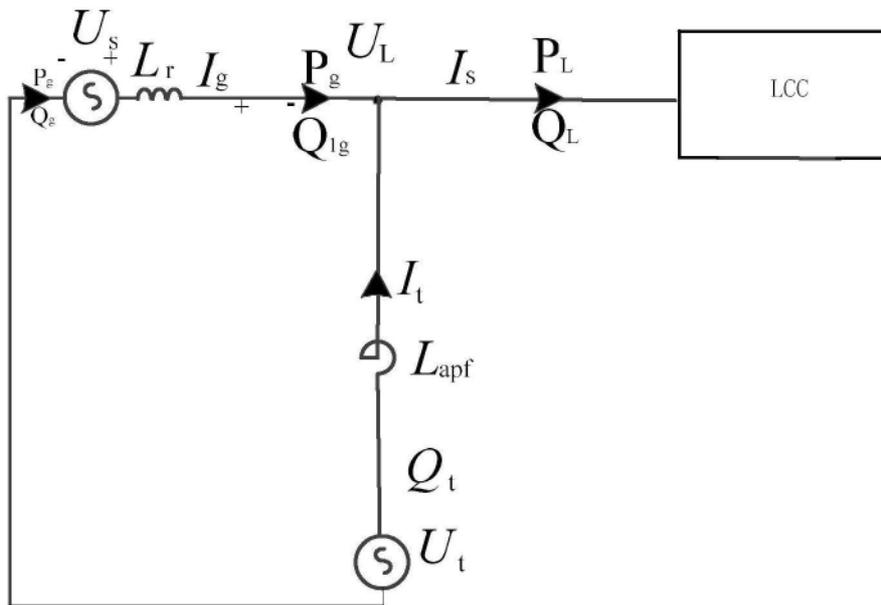


图2

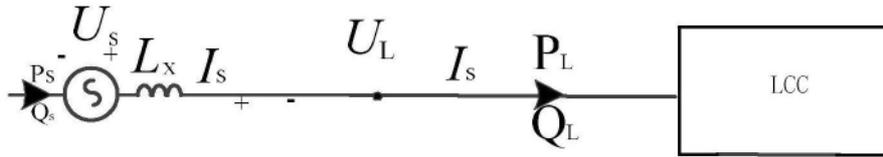


图3