



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112016043 B

(45) 授权公告日 2023. 09. 19

(21) 申请号 202010641371.3

G01R 19/00 (2006.01)

(22) 申请日 2020.07.06

H02H 1/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H02H 7/125 (2006.01)

申请公布号 CN 112016043 A

H02J 3/36 (2006.01)

(43) 申请公布日 2020.12.01

(56) 对比文件

(73) 专利权人 北京交通大学

CN 109145452 A, 2019.01.04

地址 100044 北京市海淀区西直门外上园村3号

CN 109800381 A, 2019.05.24

US 2013191092 A1, 2013.07.25

US 2018091037 A1, 2018.03.29

(72) 发明人 和敬涵 李猛 罗易萍 王小君

许寅 张大海 罗国敏 张放

吴翔宇 倪平浩 王颖

张国驹; 祁新春; 陈瑶; 亓丽; 岳程燕. 模块化多电平换流器直流双极短路特性分析. 电力系统自动化. 2016, (第12期), 第156-162、204页.

王树东; 丁延军; 王焕宇; 高翔; 李子广. MMC-HVDC直流双极短路故障电流分析. 测控技术. 2017, (第11期), 第137-141、146页.

(74) 专利代理机构 北京市商泰律师事务所

11255

专利代理师 黄晓军

审查员 周晓童

(51) Int. Cl.

G06F 17/18 (2006.01)

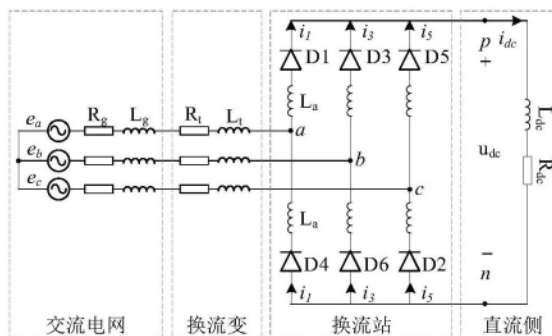
权利要求书6页 说明书15页 附图3页

(54) 发明名称

模块化多电平换流器的稳态故障电流的计算方法

(57) 摘要

本发明提供了一种模块化多电平换流器(MMC)的稳态故障电流的计算方法。该方法包括:根据MMC的桥臂电感系数k和交流侧电抗 $X_{ac}$ 计算出MMC的直流侧临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ ;根据 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 判断MMC的工作模式;根据参数k,  $U_s$ ,  $R_{dc}$ 和直流侧临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的各种工作模式下稳态直流故障电流和导通重叠角,根据各种工作模式下的直流电流和导通重叠角,分别计算出不考虑交流侧电阻时各种工作模式下的稳态交流故障电流幅值和相角。进而计算出考虑交流侧电阻时各种工作模式下的稳态交流故障电流幅值和相角。本发明的方法能够同时获得MMC故障稳态阶段交流侧和直流侧的故障电流;计算精度高,不需要额外的迭代算法;能够适应交流侧电网电阻较大的场景。



1. 一种模块化多电平换流器的稳态故障电流的计算方法,其特征在于,包括:

步骤1:获取模块化多电平换流器MMC的参数: $k, U_s, X_{ac}, R_{dc}, U_s$ 为换流器交流侧电源幅值, $k$ 为桥臂电感系数, $U_s$ 为MMC交流侧等值电源的相电压幅值, $X_{ac}$ 为MMC交流侧等值电抗, $R_{dc}$ 为MMC直流侧的电阻,根据所述参数 $k$ 和 $X_{ac}$ 计算出MMC的直流侧临界电阻值 $R_{A/B}, R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ ;

步骤2:当满足 $R_{A/B} \leq R_{dc}$ 时,判断MMC处于工作模式A;当满足 $R_{B/C} \leq R_{dc} \leq R_{A/B}$ 时,判断MMC处于工作模式B;当满足 $R_{C/D} \leq R_{dc} \leq R_{B/C}$ 时,判断MMC处于工作模式C;当满足 $0 \leq R_{dc} \leq R_{C/D}$ 时,判断MMC处于工作模式D;在工作模式A中, $\gamma = 0^\circ$ ,在工作模式B中, $0^\circ < \gamma < 60^\circ$ ,在工作模式C中, $60^\circ < \gamma < 120^\circ$ ,在工作模式D中, $120^\circ < \gamma < 180^\circ$ , $\gamma$ 为MMC各相上、下桥臂在半个交流周期内的导通重叠角度;

步骤3:根据所述参数 $k, U_s, R_{dc}$ 和直流侧临界电阻值 $R_{A/B}, R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ ,在工作模式A中, $\beta = \gamma = 0^\circ$ ,在工作模式B中, $0^\circ < \beta = \gamma < 60^\circ$ ,在工作模式C中, $0^\circ < \beta = \gamma - 60^\circ < 60^\circ$ ,在工作模式D中, $0^\circ < \beta = \gamma - 120^\circ < 60^\circ$ ;

步骤4:根据工作模式A、B、C和D的直流电流和导通重叠角,分别计算出不考虑交流侧电阻时工作模式A、B、C和D的稳态交流故障电流幅值 $I_{sm}$ 和相角 $\varphi$ ;

MMC故障稳态阶段等效电路结构包括依次串连连接的交流电网单元、换流变压器、换流器和直流侧单元4个部分,交流电网单元包括互相并联的三相等值电源 $e_j, j = a, b, c$ ,其幅值为 $U_s$ ,三相等值电源 $e_a, e_b, e_c$ 都分别与交流电网单元中的 $L_g, R_g$ 、换流变压器中的 $L_t, R_t$ 串连连接, $L_g, R_g$ 为交流电网的等值电感、等值电阻, $L_t, R_t$ 为换流变压器的等值电感、等值电阻,三相等值电源 $e_a, e_b, e_c$ 还分别与换流器中的a、b、c三相二极管电路串连连接,a相二极管电路包括串连连接的上二极管D1和下二极管D4,b相二极管电路包括串连连接的上二极管D3和下二极管D6,c相二极管电路包括串连连接的上二极管D5和下二极管D2,直流侧单元包括串连连接的直流侧电感 $L_{dc}$ 和电阻 $R_{dc}$ ; $L_a$ 为MMC桥臂电感;

在所述工作模式A中,MMC每相上、下二极管将交替导通 $180^\circ$ ,任意时刻换流器有且仅有3个二极管导通;

在所述工作模式B中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在3个二极管同时导通情况,也存在4个二极管同时导通情况,换流器以3-4模式连续交替导通;

在所述工作模式C中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在4个二极管同时导通情况,也存在5个二极管同时导通情况,换流器以4-5模式连续交替导通;

在所述工作模式D中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在5个二极管同时导通情况,也存在6个二极管同时导通情况,换流器以5-6模式连续交替导通;

所述的根据所述参数 $k$ 和 $X_{ac}$ 计算出MMC的临界电阻值 $R_{A/B}, R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ ,包括:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{A/B} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{9(1+k)}{(3-4k+k^2)} \\ R_{B/C} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(k^2-3k)((k-2)\sqrt{9+3k^2}+3\sqrt{7-4k+k^2})}{(k^2-1)(\sqrt{9+3k^2}-k\sqrt{7-4k+k^2})} \\ R_{C/D} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(2k-k^2)(\sqrt{7-4k+k^2}-3+k)}{(k-1)(\sqrt{7-4k+k^2}-1-k)} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中 $X_{ac} = \omega L_g + \omega L_t$ ,  $L_g$ 、 $L_t$ 分别为MMC交流侧电网的等值电感和变压器的等值电感,  $\omega$ 为交流电网的角频率;

所述的根据所述参数 $k$ ,  $U_s$ ,  $R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ , 包括:

MMC稳态直流侧故障电流 $i_{dc}$ 为MMC的上桥臂上的a、b、c三相二极管电路的故障电流 $i_1$ 、 $i_3$ 和 $i_5$ 之和, 即 $i_{dc} = i_1 + i_3 + i_5$ , 所述a、b、c三相二极管电路互相对称,  $i_1$ 、 $i_3$ 、 $i_5$ 的波形相同, 初相角互差 $120^\circ$ , MMC稳态交流侧故障电流的峰值与各相二极管电路的故障电流的峰值相同;

根据所述工作模式A、B、C和D下a、b和c三相二极管电路的导通状态, 将电流 $i_1$ 划分为多个区间进行逐个求解, 根据 $i_1$ 以及 $i_1$ 、 $i_3$ 、 $i_5$ 间的相角关系得到电流 $i_3$ 和 $i_5$ 的值, 根据 $i_1$ 、 $i_3$ 和 $i_5$ 的值以及直流侧电压电流的关系, 推导出考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D的稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ ;

所述的根据所述参数 $k$ ,  $U_s$ ,  $R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和的导通重叠角 $\beta$ , 包括:

在工作模式B下的直流电流平均值 $I_{dc}$ 、交流电流幅值 $I_{sm}$ 与桥臂上的a相二极管电路电流 $i_1$ 的关系为:

$$I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (2)$$

$$I_{sm} = i_1(\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (3)$$

其中,  $\alpha$ 是电流 $i_1$ 过零并且开始上升时刻所对应的电角度,  $\beta$ 是模式B下的导通重叠角;

将求取 $I_{dc}$ 和 $I_{sm}$ 的表达式转化为求取 $i_1$ 在区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 内的表达式, 将区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 拆分为3个子区间 $[\alpha, \alpha + \beta]$ 、 $[\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ 和 $[\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$ 进行分段求解;

推导步骤1: 求解直流电流

在子区间1 ( $\omega t \in [\alpha, \alpha + \beta]$ ) 内, D4、D5、D6、D1导通, 利用电路原理求解此时的换流器等效电路, 得到子区间1内直流电压 $u_{dc}^1$ 和桥臂电流 $i_1^1$ 表达式;

同理, 在子区间2 ( $\omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ ) 和子区间3  $[\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$  内, 分别求出直流侧电压和二极管D1的电流, 分别表示为 $u_{dc}^2$ ,  $i_1^2$ 和 $u_{dc}^3$ ,  $i_1^3$ ;

则 $i_1$ 表示为一个分段函数, 如下式所示:

$$i_1 = \begin{cases} i_1^1, & \omega t \in [\alpha, \alpha + \beta] \\ i_1^2, & \omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3] \\ i_1^3, & \omega t \in [\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3] \end{cases} \quad (4)$$

其边界条件如下式所示：

$$\begin{cases} i_1^1(\omega t = \alpha) = 0 \\ i_1^2(\omega t = \alpha + \beta) = i_1^1(\omega t = \alpha + \beta) \\ i_1^3(\omega t = \alpha + \pi/3) = i_1^2(\omega t = \alpha + \pi/3) \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)和(5),并将 $I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \gamma + \pi/3)$ 代入 $i_1$ 的表达式中,求得直流电流平均值表达式为:

$$I_{dc} = (U_s/4\omega)(A\sin\beta + B\cos\beta + C) \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} A = (12m - 3p)\sin\alpha + \sqrt{3}p\cos\alpha \\ B = (-12m + 3p)\cos\alpha + \sqrt{3}p\sin\alpha \\ C = (12m - 3p)\cos\alpha + \sqrt{3}p\sin\alpha \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{且, } m = \frac{1}{3L_{ac} + 2L_a}, \quad n = \frac{2(L_{ac} + L_a)}{(L_{ac} + 2L_a)}m, \quad p = \frac{1}{(L_t + L_a)}$$

推导步骤2:求解直流电压

直流电压通过对1/6工频周期内的直流电压积分求平均值得到,由子区间1和子区间2的直流电压 $u_{dc}^1$ 、 $u_{dc}^2$ 求得直流电压为:

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{(\alpha)/\omega}^{(\alpha+\gamma)/\omega} u_{dc}^1 d(\omega t) + \int_{(\alpha+\gamma)/\omega}^{(\alpha+\pi/3)/\omega} u_{dc}^2 d(\omega t) \right] \quad (8)$$

化简整理得到:

$$U_{dc} = (3U_s/4\pi)(D\sin\beta + E\cos\beta + F) \quad (9)$$

$$\begin{cases} D = \sqrt{3}(4f - 3)\cos\alpha - 3\sin\alpha \\ E = \sqrt{3}(4f - 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \\ F = \sqrt{3}(-4f + 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{且, } f = \frac{L_a}{(L_{ac} + 2L_a)}$$

由式(6)、(9)可知,直流电压和直流电流表达式将包含 $\alpha$ 和 $\beta$ 两个未知数,为求出直流电流和直流电压的表达式,还需要额外的两个约束:

对于直流侧,始终存在如下约束:

$$U_{dc} = I_{dc}R_{dc} \quad (11)$$

对初始导通角 $\alpha$ 的值进行预估:

推导步骤3:初始导通角预估

设当仅有二极管D4、D5、D6导通时,求得D1两端的电压 $u_{D1}$ ,当 $u_{D1} > 0$ 时,D1导通,换流器将

会出现四个二极管D4、D5、D6、D1同时导通的情况,认为 $u_{D1}$ 过零且开始正向增长的时刻为电流 $i_1$ 的初始导通角 $\alpha$ ,令 $u_{D1}=0$ ,则求得初始导通相角 $\alpha$ 满足如下关系式:

$$\tan \alpha = \frac{3-k}{\sqrt{3}(k+1)} \quad (12)$$

推导步骤4:稳态直流故障电流解析表达

将式(11)、(12)所示的两个约束代入到直流电流和直流电压表达式中,则得到MMC稳态直流故障电流平均值的解析表达为:

$$I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k)+\pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (13)$$

推导步骤5:导通重叠角求解

将稳态直流故障电流平均值解析表达式(13)代入到(6)中,求得导通重叠角 $\beta$ 为:

$$\beta = \arcsin \frac{(4\omega/U_s)I_{dc} - C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \arctan \frac{B}{A} \quad (14)$$

推导步骤6:稳态交流故障电流幅值表达式

将 $i_1$ 和 $\beta$ 代入到式(3)中,求得MMC稳态交流故障电流的幅值为:

$$I_{sm} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k)+\pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (15)$$

推导步骤7:稳态交流故障电流的相角表达式

根据换流器交直流侧功率守恒,求出MMC稳态交流故障电流的相角 $\varphi$ 为:

$$\varphi = \arccos(R_{dc}I_{dc}^2/(U_s I_{sm})) \quad (16)。$$

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述的根据所述参数 $k, U_s, R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}, R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和的导通重叠角 $\beta$ ,包括:

在工作模式A下:

稳态直流故障电流平均值为:

$$I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (17)$$

稳态交流故障电流幅值:

$$I_{sm} = \frac{\pi}{3} \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (18)$$

在工作模式C下:

稳态直流故障电流平均值:

$$I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}} \quad (19)$$

稳态交流故障电流幅值：

$$I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{1}{2(k-3)(k-2)\sqrt{7-4k+k^2}} \left( \begin{array}{l} 6\sqrt{3}(k-1)(k-2)\sin\beta \\ + (24-55k+41k^2-11k^3+k^4)\cos\beta \\ + (7k-11k^2+5k^3-k^4) \end{array} \right) \quad (20)$$

其中， $\beta$ 通过模式C下的式(14)求得；

稳态交流故障电流相角通过模式C下的式(16)求得；

在工作模式D下：

稳态直流故障电流平均值：

$$I_{dc} = \frac{3k(1-k)U_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}} \quad (21)$$

稳态交流故障电流幅值：

$$I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{k(k-1)}{(k-2)} \left( \frac{\sqrt{3}}{4}\sin\beta + \frac{1}{4}\cos\beta + 2 \right) \quad (22)$$

其中， $\beta$ 通过模式D下的式(14)求得。

3. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述的方法还包括：

考虑交流侧电阻的MMC稳态交、直流故障电流的计算过程包括：将不考虑交流侧阻尼的换流器等效成阻抗为 $Z_c$  ( $Z_c = R_c + jX_c$ ) 的三相对称负载，换流器交流侧电压、电流相量分别为 $\dot{E}$ 、 $\dot{I}$ ，其幅值分别为 $U_s$ 、 $I_{sm}$ ，此时换流器交流侧的等效电压、电流相量分别为 $\dot{E}'$ 、 $\dot{I}'$ ，其幅值分别为 $U'_s$ 、 $I'_{sm}$ ；

根据三相等效电路图求得更新后的MMC稳态交流故障电流幅值和相角分别为：

$$I'_{sm} = \frac{U_s}{\sqrt{(R_{ac} + R_c)^2 + X_c^2}} \quad (23)$$

$$\varphi' = \arctan \frac{X_c}{R_{ac} + R_c} \quad (24)$$

$$\text{其中，} R_c = \frac{U_s \cos\varphi}{I_{sm}}, \quad X_c = \frac{U_s \sin\varphi}{I_{sm}}$$

更新后的交流侧电源幅值为：

$$U'_s = \sqrt{(U_s - R_{ac}I'_{sm} \cos(\varphi'))^2 + (R_{ac}I'_{sm} \sin(\varphi'))^2} \quad (25)$$

考虑交流侧电阻的MMC稳态直流故障电流通过将推导得出的表达式中的 $U_s$ 替换为新的交流电源幅值 $U'_s$ 求得；

在工作模式A下：

考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U'_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}}$$

在工作模式B下：

考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U'_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)}$$

在工作模式C下：

考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U'_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}}$$

在工作模式D下：

考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$I_{dc} = \frac{3k(1-k)U'_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}}$$

## 模块化多电平换流器的稳态故障电流的计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及直流电网技术领域,尤其涉及一种模块化多电平换流器(modular multilevel converter,MMC)的稳态故障电流的计算方法。

### 背景技术

[0002] 随着分布式能源的不断发展和用户对供电质量和供电可靠性要求的不断提高,基于电压源型换流器(voltage source converter,VSC)的柔性直流输、配电网技术受到了人们的广泛关注。在已有的VSC拓扑中,模块化多电平换流器MMC因其模块化设计、低损耗和高波形质量的特点成为了最具前景的换流器,目前已有多个基于模块化多电平换流器的直流电网投入运行。

[0003] 柔性直流电网最大的挑战之一是直流侧故障的保护,由于直流系统阻尼小,在直流侧短路故障情况下,直流故障电流通常在很短时间内攀升至额定值的十几倍。为设计有效的保护方案和设备合理选型,必须对直流短路故障电流进行准确预估。然而,现有技术的故障电流计算方法大多基于数值求解,尽管能够给出单一故障场景下的具体波形,但也存在计算精度与效率相互矛盾、受模型制约、无法揭示参数对故障电流的影响机理等问题。随着工程建设的不断推进,摆脱仿真依赖,建立故障解析分析方法成为了从根本上解决柔性直流电网故障、保护难题,保障其长远发展的必然选择。

[0004] 为进行故障电流解析计算,现有技术通常将MMC故障过程分为闭锁前和闭锁后两个阶段。换流器闭锁前故障电流主要为MMC中的子模块放电电流,因此换流器可以近似等效为线性RLC(电阻,电感和电容串联)放电电路,针对这一阶段的直流故障电流解析计算已较为成熟,而交流侧由于故障电流较小,通常可以忽略不计。闭锁后阶段也被称为交流馈入阶段,这一阶段中,交流电源成为故障电流的主要来源,在交直流侧都会有较大的故障电流产生。针对这一阶段的交、直流故障电流解析计算报道较少,暂未形成较为准确的故障电流解析计算方法。为建立交流馈入阶段的故障电流解析计算方法,首先需对交流馈入阶段的稳态交、直流故障电流进行预估。

[0005] 目前,现有技术中的一种柔性直流电网的稳态故障电流的计算方法为:基于IEC61660标准的稳态故障电流计算方法。该方法假设换流器在每个时刻有且仅有三个桥臂同时导通,基于此假设给出了六脉波二极管整流桥稳态直流故障电流计算公式。该方法的缺点为:没有考虑换流器的桥臂电感及多种工作模式,因此并不适用于MMC。

[0006] 现有技术中的另一种柔性直流电网的稳态故障电流的计算方法为:基于整流器外特性曲线的稳态故障电流计算方法。该方法将二极管整流桥的外特性曲线进行分段线性化,并将各阶段内的换流器等效为一个带内阻的电压源,进而得到了分段表达的故障稳态故障电流计算公式。该方法的缺点为:由于换流器外特性法未考虑交流系统阻尼的影响,将其用于交流电网阻尼较大的场景中,会出现明显的计算误差,且无法得到稳态交流侧故障电流。此外,该法还需要额外的迭代算法来确定换流器所处的具体工作模式,计算过程复杂。



## 发明内容

[0007] 本发明的实施例提供了一种模块化多电平换流器的稳态故障电流的计算方法,以克服现有技术的缺点。

[0008] 为了实现上述目的,本发明采取了如下技术方案。

[0009] 一种模块化多电平换流器的稳态故障电流的计算方法,包括:

[0010] 步骤1:获取模块化多电平换流器MMC的参数: $k, U_s, X_{ac}, R_{dc}$ ,  $U_s$ 为换流器交流侧电源幅值, $k$ 为桥臂电感系数, $U_s$ 为MMC交流侧等值电源的相电压幅值, $X_{ac}$ 为MMC交流侧等值电抗, $R_{dc}$ 为MMC直流侧的电阻,根据所述参数 $k$ 和 $X_{ac}$ 计算出MMC的直流侧临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ ;

[0011] 步骤2:当满足 $R_{A/B} \leq R_{dc}$ 时,判断MMC处于工作模式A;当满足 $R_{B/C} \leq R_{dc} \leq R_{A/B}$ 时,判断MMC处于工作模式B;当满足 $R_{C/D} \leq R_{dc} \leq R_{B/C}$ 时,判断MMC处于工作模式C;当满足 $0 \leq R_{dc} \leq R_{C/D}$ 时,判断MMC处于工作模式D;在工作模式A中, $\gamma = 0^\circ$ ,在工作模式B中, $0^\circ < \gamma < 60^\circ$ ,在工作模式C中, $60^\circ < \gamma < 120^\circ$ ,在工作模式D中, $120^\circ < \gamma < 180^\circ$ , $\gamma$ 为MMC各相上、下桥臂在半个交流周期内的导通重叠角度;

[0012] 步骤3:根据所述参数 $k, U_s, R_{dc}$ 和直流侧临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ ,在工作模式A中, $\beta = \gamma = 0^\circ$ ,在工作模式B中, $0^\circ < \beta = \gamma < 60^\circ$ ,在工作模式C中, $0^\circ < \beta = \gamma - 60^\circ < 60^\circ$ ,在工作模式D中, $0^\circ < \beta = \gamma - 120^\circ < 60^\circ$ ;

[0013] 步骤4:根据工作模式A、B、C和D的直流电流和导通重叠角,分别计算出不考虑交流侧电阻时工作模式A、B、C和D的稳态交流故障电流幅值 $I_{sm}$ 和相角 $\varphi$ 。

[0014] 优选地,MMC故障稳态阶段等效电路结构包括依次串连连接的交流电网单元、换流变压器、换流器和直流侧单元4个部分,交流电网单元包括互相并联的三相等值电源 $e_j$ , $j = a, b, c$ ,其幅值为 $U_s$ ,三相等值电源 $e_a, e_b, e_c$ 都分别与交流电网单元中的 $L_g, R_g$ 、换流变压器中的 $L_t, R_t$ 串连连接, $L_g, R_g$ 为交流电网的等值电感、等值电阻, $L_t, R_t$ 为换流变压器的等值电感、等值电阻,三相等值电源 $e_a, e_b, e_c$ 还分别与换流器中的a、b、c三相二极管电路串连连接,a相二极管电路包括串连连接的上二极管D1和下二极管D4,b相二极管电路包括串连连接的上二极管D3和下二极管D6,c相二极管电路包括串连连接的上二极管D5和下二极管D2,直流侧单元包括串连连接的直流侧电感 $L_{dc}$ 和电阻 $R_{dc}$ ; $L_a$ 为MMC桥臂电感;

[0015] 在所述工作模式A中,MMC每相上、下二极管将交替导通 $180^\circ$ ,任意时刻换流器有且仅有3个二极管导通;

[0016] 在所述工作模式B中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在3个二极管同时导通情况,也存在4个二极管同时导通情况,换流器以3-4模式连续交替导通;

[0017] 在所述工作模式C中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在4个二极管同时导通情况,也存在5个二极管同时导通情况,换流器以4-5模式连续交替导通;

[0018] 在所述工作模式D中,在 $1/6$ 工频周期内,换流器既存在5个二极管同时导通情况,也存在6个二极管同时导通情况,换流器以5-6模式连续交替导通。

[0019] 优选地,所述的根据所述参数 $k$ 和 $X_{ac}$ 计算出MMC的临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ ,包括:

$$[0020] \quad \begin{cases} R_{A/B} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{9(1+k)}{(3-4k+k^2)} \\ R_{B/C} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(k^2-3k)\left((k-2)\sqrt{9+3k^2}+3\sqrt{7-4k+k^2}\right)}{(k^2-1)\left(\sqrt{9+3k^2}-k\sqrt{7-4k+k^2}\right)} \\ R_{C/D} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(2k-k^2)\left(\sqrt{7-4k+k^2}-3+k\right)}{(k-1)\left(\sqrt{7-4k+k^2}-1-k\right)} \end{cases} \quad (26)$$

[0021] 其中 $X_{ac} = \omega L_g + \omega L_t$ ,  $L_g$ 、 $L_t$ 分别为MMC交流侧电网的等值电感和变压器的等值电感,  $\omega$ 为交流电网的角频率。

[0022] 优选地,所述的根据所述参数 $k$ ,  $U_s$ ,  $R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ ,包括:

[0023] MMC稳态直流侧故障电流 $i_{dc}$ 为MMC的上桥臂上的a、b、c三相二极管电路的故障电流 $i_1$ 、 $i_3$ 和 $i_5$ 之和,即 $i_{dc} = i_1 + i_3 + i_5$ ,所述a、b、c三相二极管电路互相对称, $i_1$ 、 $i_3$ 、 $i_5$ 的波形相同,初相角互差 $120^\circ$ ,MMC稳态交流侧故障电流的峰值与各相二极管电路的故障电流的峰值相同;

[0024] 根据所述工作模式A、B、C和D下a、b和c三相二极管电路的导通状态,将电流 $i_1$ 划分为多个区间进行逐个求解,根据 $i_1$ 以及 $i_1$ 、 $i_3$ 、 $i_5$ 间的相角关系得到电流 $i_3$ 和 $i_5$ 的值,根据 $i_1$ 、 $i_3$ 和 $i_5$ 的值以及直流侧电压电流的关系,推导出考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D的稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和导通重叠角 $\beta$ 。

[0025] 优选地,所述的根据所述参数 $k$ ,  $U_s$ ,  $R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和的导通重叠角 $\beta$ ,包括:

[0026] 在工作模式B下的直流电流平均值 $I_{dc}$ 、交流电流幅值 $I_{sm}$ 与桥臂上的a相二极管电路电流 $i_1$ 的关系为:

$$[0027] \quad I_{dc} = i_1 (\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (27)$$

$$[0028] \quad I_{sm} = i_1 (\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (28)$$

[0029] 其中, $\alpha$ 是电流 $i_1$ 过零并且开始上升时刻所对应的电角度, $\beta$ 是模式B下的导通重叠角;

[0030] 将求取 $I_{dc}$ 和 $I_{sm}$ 的表达式转化为求取 $i_1$ 在区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 内的表达式,将区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 拆分为3个子区间 $[\alpha, \alpha + \beta]$ 、 $[\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ 和 $[\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$ 进行分段求解;

[0031] 推导步骤1:求解直流电流

[0032] 在子区间1 ( $\omega t \in [\alpha, \alpha + \beta]$ )内,D4、D5、D6、D1导通,利用电路原理求解此时的换流器等效电路,得到子区间1内直流电压 $u_{dc}^1$ 和桥臂电流 $i_1^1$ 表达式;

[0033] 同理,在子区间2 ( $\omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ )和子区间3  $[\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$ 内,分别求出直流侧电压和二极管D1的电流,分别表示为 $u_{dc}^2, i_1^2$ 和 $u_{dc}^3, i_1^3$ ;

[0034] 则 $i_1$ 表示为一个分段函数,如下式所示。

$$[0035] \quad i_1 = \begin{cases} i_1^1, & \omega t \in [\alpha, \alpha + \beta] \\ i_1^2, & \omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3] \\ i_1^3, & \omega t \in [\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3] \end{cases} \quad (29)$$

[0036] 其边界条件如下式所示。

$$[0037] \quad \begin{cases} i_1^1(\omega t = \alpha) = 0 \\ i_1^2(\omega t = \alpha + \beta) = i_1^1(\omega t = \alpha + \beta) \\ i_1^3(\omega t = \alpha + \pi/3) = i_1^2(\omega t = \alpha + \pi/3) \end{cases} \quad (30)$$

[0038] 联立式(29)和(30),并将 $I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \gamma + \pi/3)$ 代入 $i_1$ 的表达式中,求得直流电流表达式为:

$$[0039] \quad I_{dc} = (U_s/4\omega)(A\sin\beta + B\cos\beta + C) \quad (31)$$

[0040] 其中,

$$[0041] \quad \begin{cases} A = (12m - 3p)\sin\alpha + \sqrt{3}p\cos\alpha \\ B = (-12m + 3p)\cos\alpha + \sqrt{3}p\sin\alpha \\ C = (12m - 3p)\cos\alpha + \sqrt{3}p\sin\alpha \end{cases} \quad (32)$$

$$[0042] \quad \text{且, } m = \frac{1}{3L_{ac} + 2L_a}, \quad n = \frac{2(L_{ac} + L_a)}{(L_{ac} + 2L_a)}m, \quad p = \frac{1}{(L_t + L_a)}。$$

[0043] 推导步骤2:求解直流电压

[0044] 直流电压通过对1/6工频周期内的直流电压积分求平均值得到,由子区间1和子区间2的直流电压 $u_{dc}^1$ 、 $u_{dc}^2$ 求得直流电压为:

$$[0045] \quad U_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{(\alpha)/\omega}^{(\alpha+\gamma)/\omega} u_{dc}^1 d(\omega t) + \int_{(\alpha+\gamma)/\omega}^{(\alpha+\pi/3)/\omega} u_{dc}^2 d(\omega t) \right] \quad (33)$$

[0046] 化简整理得到:

$$[0047] \quad U_{dc} = (3U_s/4\pi)(D\sin\beta + E\cos\beta + F) \quad (34)$$

$$[0048] \quad \begin{cases} D = \sqrt{3}(4f - 3)\cos\alpha - 3\sin\alpha \\ E = \sqrt{3}(4f - 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \\ F = \sqrt{3}(-4f + 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \end{cases} \quad (35)$$

$$[0049] \quad \text{且, } f = \frac{L_a}{(L_{ac} + 2L_a)}。$$

[0050] 由式(31)、(34)可知,直流电压和直流电流表达式将包含 $\alpha$ 和 $\beta$ 两个未知数,为求出直流电流和直流电压的表达式,还需要额外的两个约束。

[0051] 对于直流侧,始终存在如下约束:

$$[0052] \quad U_{dc} = I_{dc}R_{dc}. \quad (36)$$

[0053] 对初始导通角 $\alpha$ 的值进行预估。

[0054] 推导步骤3:初始导通角预估

[0055] 设当仅有二极管D4、D5、D6导通时,求得D1两端的电压 $u_{D1}$ ,当 $u_{D1} > 0$ 时,D1导通,换流器将会出现四个二极管D4、D5、D6、D1同时导通的情况,认为 $u_{D1}$ 过零且开始正向增长的时刻为电流 $i_1$ 的初始导通角 $\alpha$ ,令 $u_{D1} = 0$ ,则求得初始导通相角 $\alpha$ 满足如下关系式:

$$[0056] \quad \tan \alpha = \frac{3-k}{\sqrt{3}(k+1)} \quad (37)$$

[0057] 推导步骤4:稳态直流故障电流解析表达

[0058] 将式(36)、(37)所示的两个约束代入到直流电流和直流电压表达式中,则得到MMC稳态直流故障电流平均值的解析表达为:

$$[0059] \quad I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (38)$$

[0060] 推导步骤5:导通重叠角求解

[0061] 将稳态直流故障电流平均值解析表达式(38)代入到(31)中,求得导通重叠角 $\beta$ 为:

$$[0062] \quad \beta = \arcsin \frac{(4\omega/U_s)I_{dc} - C}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \arctan \frac{B}{A} \quad (39)$$

[0063] 推导步骤6:稳态交流故障电流幅值表达式

[0064] 将 $i_1$ 和 $\beta$ 代入到式(28)中,求得MMC稳态交流故障电流的幅值为:

$$[0065] \quad I_{sm} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (40)$$

[0066] 推导步骤7:稳态交流故障电流的相角表达式

[0067] 根据换流器交直流侧功率守恒,求出MMC稳态交流故障电流的相角 $\varphi$ 为:

$$[0068] \quad \varphi = \arccos \left( R_{dc} I_{dc}^2 / (U_s I_{sm}) \right) \quad (41)。$$

[0069] 优选地,所述的根据所述参数 $k$ , $U_s$ , $R_{dc}$ 和临界电阻值 $R_{A/B}$ 、 $R_{B/C}$ 和 $R_{C/D}$ 分别计算出不考虑交流侧电阻时的工作模式A、B、C和D下稳态直流故障电流平均值 $I_{dc}$ 和的导通重叠角 $\beta$ ,包括:

[0070] 在工作模式A下:

[0071] 稳态直流故障电流平均值为:

$$[0072] \quad I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (42)$$

[0073] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0074] \quad I_{sm} = \frac{\pi}{3} \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (43)$$

[0075] 在工作模式C下:

[0076] 稳态直流故障电流平均值:

$$[0077] \quad I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}} \quad (44)$$

[0078] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0079] \quad I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{1}{2(k-3)(k-2)\sqrt{7-4k+k^2}} \left( \begin{array}{l} 6\sqrt{3}(k-1)(k-2)\sin\beta \\ +(24-55k+41k^2-11k^3+k^4)\cos\beta \\ +(7k-11k^2+5k^3-k^4) \end{array} \right) \quad (45)$$

[0080] 其中, $\beta$ 通过模式C下的式(39)求得。

[0081] 稳态交流故障电流相角通过模式C下的式(41)求得。

[0082] 在工作模式D下:

[0083] 稳态直流故障电流平均值:

$$[0084] \quad I_{dc} = \frac{3k(1-k)U_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}} \quad (46)$$

[0085] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0086] \quad I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{k(k-1)}{(k-2)} \left( \frac{\sqrt{3}}{4}\sin\beta + \frac{1}{4}\cos\beta + 2 \right) \quad (47)$$

[0087] 其中, $\beta$ 通过模式D下的式(39)求得。

[0088] 优选地,所述的方法还包括:

[0089] 考虑交流侧电阻的MMC稳态交、直流故障电流的计算过程包括:将不考虑交流侧阻尼的换流器等效成阻抗为 $Z_c$  ( $Z_c = R_c + jX_c$ )的三相对称负载,换流器交流侧电压、电流相量分别为 $\dot{E}$ 、 $\dot{i}$ ,其幅值分别为 $U_s$ 、 $I_{sm}$ ,此时换流器交流侧的等效电压、电流相量分别为 $\dot{E}'$ 、 $\dot{i}'$ ,其幅值分别为 $U'_s$ 、 $I'_{sm}$ ;

[0090] 根据三相等效电路图求得更新后的MMC稳态交流故障电流幅值和相角分别为:

$$[0091] \quad I'_{sm} = \frac{U_s}{\sqrt{(R_{ac} + R_c)^2 + X_c^2}} \quad (48)$$

$$[0092] \quad \varphi' = \arctan \frac{X_c}{R_{ac} + R_c} \quad (49)$$

$$[0093] \quad \text{其中, } R_c = \frac{U_s \cos\varphi}{I_{sm}}, \quad X_c = \frac{U_s \sin\varphi}{I_{sm}} \text{。}$$

[0094] 更新后的交流侧电源幅值为:

$$[0095] \quad U'_s = \sqrt{\left( U_s - R_{ac} I'_{sm} \cos(\varphi') \right)^2 + \left( R_{ac} I'_{sm} \sin(\varphi') \right)^2} \quad (50)$$

[0096] 考虑交流侧电阻的MMC稳态直流故障电流通过将推导得出的表达式中的 $U_s$ 替换为新的交流电源幅值 $U'_s$ 求得;

[0097] 在工作模式A下：

[0098] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$[0099] \quad I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U'_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} .$$

[0100] 在工作模式B下：

[0101] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$[0102] \quad I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U'_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)}$$

[0103] 在工作模式C下：

[0104] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$[0105] \quad I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U'_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}}$$

[0106] 在工作模式D下：

[0107] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流平均值为：

$$[0108] \quad I_{dc} = \frac{3k(1-k)U'_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}}$$

[0109] 由上述本发明的实施例提供的技术方案可以看出，应用本发明实施例的方法能够同时获得MMC故障稳态阶段交流侧和直流侧的故障电流值；计算精度高，计算过程简单，不需要额外的迭代算法；能够适应交流侧电网阻尼较大的场景；提供的解析表达式能够反映系统参数和稳态故障电流的内在关系。

[0110] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，这些将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

## 附图说明

[0111] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案，下面将对实施例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。

[0112] 图1为本发明实施例提供的一种MMC故障稳态阶段的等效电路图；

[0113] 图2为本发明实施例提供的一种MMC的四种工作模式下桥臂电流（二极管电流）的故障电流波形图；

[0114] 图3为本发明实施例提供的一种MMC三相等效电路图；

[0115] 图4为本发明实施例提供的一种MMC交、直流侧稳态故障电流计算流程图；

[0116] 图5为本发明实施例提供的一种不同故障距离时稳态故障电流计算结果示意图；

[0117] 图6为本发明实施例提供的一种不同交流侧R/X时稳态故障电流计算结果示意图。

## 具体实施方式

[0118] 下面详细描述本发明的实施方式,所述实施方式的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施方式是示例性的,仅用于解释本发明,而不能解释为对本发明的限制。

[0119] 本技术领域技术人员可以理解,除非特意声明,这里使用的单数形式“一”、“一个”、“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是,本发明的说明书中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件,但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。应该理解,当我们称元件被“连接”或“耦接”到另一元件时,它可以直接连接或耦接到其他元件,或者也可以存在中间元件。此外,这里使用的“连接”或“耦接”可以包括无线连接或耦接。这里使用的措辞“和/或”包括一个或多个相关联的列出项的任一单元和全部组合。

[0120] 本技术领域技术人员可以理解,除非另外定义,这里使用的所有术语(包括技术术语和科学术语)具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是,诸如通用字典中定义的那些术语应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义,并且除非像这里一样定义,不会用理想化或过于正式的含义来解释。

[0121] 为便于对本发明实施例的理解,下面将结合附图以几个具体实施例为例做进一步的解释说明,且各个实施例并不构成对本发明实施例的限定。

[0122] 本发明提出了一种精度更高、适用性更强、计算更简洁的MMC稳态故障电流的解析计算方法。该方法通过对换流器不同工作模式下的二极管电流进行分段求解,得到了不考虑交流侧电阻的稳态交、直流故障电流解析表达式。

[0123] 1 MMC故障稳态阶段的工作模式

[0124] MMC故障稳态阶段可以等效为二极管不控整流桥,MMC故障稳态阶段的等效电路图如图1所示。包括依次串连连接的交流电网单元、换流变压器、换流器和直流侧单元4个部分,交流电网单元包括互相并联的三相等值电源 $e_j$  ( $j=a, b, c$ ),其幅值为 $U_s$ ,三相等值电源 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 都分别与交流电网单元中的 $L_g$ 、 $R_g$ 、换流变压器中的 $L_t$ 、 $R_t$ 串连连接, $L_g$ 、 $R_g$ 为交流电网的等值电感、等值电阻,可以通过与MMC相连的交流侧公共点处的短路比SCR (Short-circuit ratio) 和交流电网 $R/X$ 比求得。 $L_t$ 、 $R_t$ 为换流变压器的等值电感、等值阻抗(均已转换到变压器二次侧)。三相等值电源 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 还分别与换流器中的a、b、c三相二极管电路串连连接,a相二极管电路包括串连连接的上二极管D1和下二极管D4,b相二极管电路包括串连连接的上二极管D3和下二极管D6,c相二极管电路包括串连连接的上二极管D5和下二极管D2。直流侧单元包括串连连接的直流侧电感 $L_{dc}$ 和电阻 $R_{dc}$ ; $L_a$ 为MMC桥臂电感。

[0125] 在传统的六脉波整流桥的主要工作模式中,换流器各相上、下二极管在一个工频周期内交替导通 $180^\circ$ ,上、下二极管(等同于上、下桥臂)的导通区间互不重叠,每个时刻有且仅有3个二极管同时导通。但是在MMC中,由于桥臂电感的存在,MMC每相上、下二极管导通区间将出现重叠,重叠区间内将会有多于3个二极管处于同时导通状态。定义每 $1/2$ 工频周期内换流器每相上、下二极管重叠的角度为导通重叠角 $\gamma$  ( $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ )。则依据导通重叠角 $\gamma$ 的大小,MMC存在四种主要工作模式,各工作模式下桥臂电流(二极管电流)的故障电流波形图如图2所示。

[0126] 1) 模式A ( $\gamma = 0^\circ$ ):与六脉波整流桥类似,MMC每相上、下二极管将交替导通 $180^\circ$ ,

任意时刻换流器有且仅有3个二极管导通,如图2(a)所示。

[0127] 2) 模式B( $0^\circ < \gamma < 60^\circ$ ):在1/6工频周期内,换流器既存在3个二极管同时导通情况,也存在4个二极管同时导通情况,换流器以3-4模式连续交替导通,如图2(b)所示。

[0128] 3) 模式C( $60^\circ < \gamma < 120^\circ$ ):在1/6工频周期内,换流器既存在4个二极管同时导通情况,也存在5个二极管同时导通情况,换流器以4-5模式连续交替导通,如图2(c)所示。

[0129] 4) 模式D( $120^\circ < \gamma < 180^\circ$ ):在1/6工频周期内,换流器既存在5个二极管同时导通情况,也存在6个二极管同时导通情况,换流器以5-6模式连续交替导通,如图2(d)所示。

[0130] 2 MMC稳态交、直流故障电流计算原理

[0131] MMC稳态交、直流侧故障电流的求解思路如下:由图1、图2可知,直流电流可表示为上桥臂上的三组二极管( $i_{dc} = i_1 + i_3 + i_5$ )的电流之和,而交流侧电流峰值与二极管电流峰值相同,则求出二极管的电流即可得到交、直流侧电流。又考虑到a, b, c三相对称,意味着 $i_1$ 、 $i_3$ 、 $i_5$ 故障电流波形相同,初相角互差 $120^\circ$ ,因此只需求解出任意一个二极管的电流表达式即可得到所有二极管的电流表达式,进而得到稳态交、直流故障电流值。由于MMC开关状态在不断变化,无法用一个连续的解析式来表征二极管的电流,为此,本发明以一种导通状态(如仅有3个二极管导通或仅有4个二极管导通)为一个计算区间,将二极管电流划分为多个区间进行逐个求解。

[0132] 依据上述思路,本发明通过求解A相上桥臂二极管电流( $i_1$ )来对不同工作模式下的MMC稳态直流故障电流进行推导。

[0133] 为方便求得电流 $i_1$ 的表达式,做如下准备工作:

[0134] 1) 定义各个模式下 $i_1$ 故障电流过零并开始上升的时刻所对应的相角为初始导通角 $\alpha$ ,如图2所示。

[0135] 2) 在模式B中,令 $\gamma = \beta$ 。同样地,在模式C和模式D中,分别令 $\gamma = \beta + \pi/3$ 和 $\gamma = \beta + 2\pi/3$ 。则模式A中, $\gamma = \beta = 0$ ,且有 $\beta$ 的取值范围为: $0 \leq \beta \leq \pi/3$ ,如图2所示。

[0136] 3) 定义桥臂电感系数 $k$ 如式(51)所示,其中 $X_{ac} = \omega L_g + \omega L_t$ , $X_a = \omega L_a$ 。

$$[0137] \quad k = \frac{X_a}{X_{ac} + X_a} \quad (51)$$

[0138] 4) 推导中做如下假设:a. 假设直流侧电感无穷大,意味着不考虑直流侧电流的纹波,求取直流侧稳态电流平均值。b. 忽略桥臂电阻和交流侧电阻。c. 假设二极管是理想的开关元件,意味着二极管阳极到阴极的电压大于零则立即开通,并忽略二极管的导通压降和通态电阻。

[0139] 模式B下的稳态直流故障电流和交流故障电流推导案例:

[0140] 以模式B为例,由图2(b)可知,忽略直流纹波时,直流电流平均值 $I_{dc}$ 和交流电流幅值 $I_{sm}$ 与桥臂电流 $i_1$ 的关系为:

$$[0141] \quad I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (52)$$

$$[0142] \quad I_{sm} = i_1(\omega t = \alpha + \beta + \pi/3) \quad (53)$$

[0143] 电流 $i_3$ 、 $i_5$ 可以通过 $i_1$ 移相求出来,因此,求出了 $i_1$ 就相当于求出了 $i_3$ 、 $i_5$ 。这里在计算的这个区间内,D3和D5都没有导通,只有D1导通,所以 $I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \beta + \pi/3)$ 。

[0144] 则求取 $I_{dc}$ 和 $I_{sm}$ 的表达式可以转化为求取 $i_1$ 在区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 内的表达式。为此,将区间 $[\alpha, \alpha + \beta + \pi/3]$ 拆分为3个子区间 $[\alpha, \alpha + \beta]$ 、 $[\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ 和 $[\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$ 进行分段



求解。

[0145] 推导步骤1:求解直流电流

[0146] 在子区间1 ( $\omega t \in [\alpha, \alpha + \beta]$ ) 内, D4、D5、D6、D1导通, 利用电路原理求解此时的换流器等效电路, 可以得到子区间1内直流电压  $u_{dc}^1$  和桥臂电流  $i_1^1$  表达式 (其中, 上标“1”表示第一个子区间内的电气量)。

[0147] 同理, 在子区间2 ( $\omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3]$ , 二极管D5、D6、D1导通) 和子区间3 ( $\omega t \in [\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3]$ , 二极管D5、D6、D1、D2导通) 内, 可以求出直流侧电压和二极管D1的电流, 分别表示为  $u_{dc}^2, i_1^2$  和  $u_{dc}^3, i_1^3$ 。

[0148] 则  $i_1$  可以表示为一个分段函数, 如下式所示。

$$[0149] \quad i_1 = \begin{cases} i_1^1, & \omega t \in [\alpha, \alpha + \beta] \\ i_1^2, & \omega t \in [\alpha + \beta, \alpha + \pi/3] \\ i_1^3, & \omega t \in [\alpha + \pi/3, \alpha + \beta + \pi/3] \end{cases} \quad (54)$$

[0150] 其边界条件如下式所示。

$$[0151] \quad \begin{cases} i_1^1(\omega t = \alpha) = 0 \\ i_1^2(\omega t = \alpha + \beta) = i_1^1(\omega t = \alpha + \beta) \\ i_1^3(\omega t = \alpha + \pi/3) = i_1^2(\omega t = \alpha + \pi/3) \end{cases} \quad (55)$$

[0152] 联立式 (54) 和 (55), 并将  $I_{dc} = i_1(\omega t = \alpha + \gamma + \pi/3)$  代入  $i_1$  的表达式中, 可以求得直流电流平均值的表达式为:

$$[0153] \quad I_{dc} = (U_s/4\omega) (A \sin\beta + B \cos\beta + C) \quad (56)$$

[0154] 其中,

$$[0155] \quad \begin{cases} A = (12m - 3p) \sin\alpha + \sqrt{3}p \cos\alpha \\ B = (-12m + 3p) \cos\alpha + \sqrt{3}p \sin\alpha \\ C = (12m - 3p) \cos\alpha + \sqrt{3}p \sin\alpha \end{cases} \quad (57)$$

$$[0156] \quad \text{且, } m = \frac{1}{3L_{ac} + 2L_a}, \quad n = \frac{2(L_{ac} + L_a)}{(L_{ac} + 2L_a)} m, \quad p = \frac{1}{(L_t + L_a)}。$$

[0157] 推导步骤2:求解直流电压

[0158] 直流电压可以通过对1/6工频周期内的直流电压积分求平均值得到。由子区间1和子区间2的直流电压  $u_{dc}^1$ 、 $u_{dc}^2$  可求得直流电压为:

$$[0159] \quad U_{dc} = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{(\alpha)/\omega}^{(\alpha+\gamma)/\omega} u_{dc}^1 d(\omega t) + \int_{(\alpha+\gamma)/\omega}^{(\alpha+\pi/3)/\omega} u_{dc}^2 d(\omega t) \right] \quad (58)$$

[0160] 化简整理得到:

$$[0161] \quad U_{dc} = (3U_s/4\pi) (D \sin\beta + E \cos\beta + F) \quad (59)$$

$$[0162] \quad \begin{cases} D = \sqrt{3}(4f - 3)\cos\alpha - 3\sin\alpha \\ E = \sqrt{3}(4f - 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \\ F = \sqrt{3}(-4f + 3)\sin\alpha + 3\cos\alpha \end{cases} \quad (60)$$

$$[0163] \quad \text{且, } f = \frac{L_a}{(L_{ac} + 2L_a)}。$$

[0164] 由式(56)、(59)可知,直流电压和直流电流表达式将包含 $\alpha$ 和 $\beta$ 两个未知数,为求出直流电流和直流电压的表达式,还需要额外的两个约束。

[0165] 对于直流侧,始终存在如下约束:

$$[0166] \quad U_{dc} = I_{dc} R_{dc}. \quad (61)$$

[0167] 但仅有1个约束无法求解出直流电流解析表达,因此,还需要对初始导通角 $\alpha$ 的值进行预估。

[0168] 推导步骤3:初始导通角预估

[0169] 在图1中,设当仅有二极管D4、D5、D6导通时,忽略直流电流纹波,则可求得D1两端的电压 $u_{D1}$ 。当 $u_{D1} > 0$ 时,D1导通,换流器将会出现四个二极管D4、D5、D6、D1同时导通的情况。因此,可以认为 $u_{D1}$ 过零且开始正向增长的时刻为电流 $i_1$ 的初始导通角。令 $u_{D1} = 0$ ,则可求得初始导通相角 $\alpha$ 满足如下关系式。

$$[0170] \quad \tan\alpha = \frac{3-k}{\sqrt{3}(k+1)} \quad (62)$$

[0171] 推导步骤4:稳态直流故障电流解析表达

[0172] 将式(62)、(61)所示的两个约束代入到直流电流和直流电压表达式中,则可得到稳态直流故障电流解析表达为:

$$[0173] \quad I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (63)$$

[0174] 推导步骤5:导通重叠角求解

[0175] 将稳态直流故障电流解析表达式(63)代入到(56)中,可以求得导通重叠角 $\beta$ 为:

$$[0176] \quad \beta = \arcsin\left(\frac{(4\omega/U_s)I_{dc} - C}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) + \arctan\frac{B}{A} \quad (64)$$

[0177] 推导步骤6:稳态交流故障电流幅值表达式

[0178] 上述过程中已经得到了 $i_1$ 和 $\beta$ 的表达式,将 $i_1$ 和 $\beta$ 代入到式(53)中,可求得稳态交流故障电流幅值为:

$$[0179] \quad I_{sm} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)} \quad (65)$$

[0180] 推导步骤7:稳态交流故障电流相角表达式

[0181] 根据换流器交直流侧功率守恒,可以求出稳态交流故障电流的相角 $\varphi$ 为:

$$[0182] \quad \varphi = \arccos\left(R_{dc}I_{dc}^2 / (U_s I_{sm})\right) \quad (66)$$

[0183] 其余模式下的交、直流侧故障电流表达式

[0184] 同理,在不考虑交流侧电阻情况下,模式A、模式C和模式D的稳态交、直流电流解析表达式都可以通过上述7个步骤推导得出,由于推导过程较长,此处直接给出模式A、模式C和模式D下的稳态交、直流故障电流表达式。

[0185] 模式A:

[0186] 稳态直流故障电流平均值:

$$[0187] \quad I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (67)$$

[0188] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0189] \quad I_{sm} = \frac{\pi}{3} \frac{9\sqrt{3}(1-k)U_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} \quad (68)$$

[0190] 模式C:

[0191] 稳态直流故障电流平均值:

$$[0192] \quad I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}} \quad (69)$$

[0193] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0194] \quad \left( \begin{array}{l} I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{1}{2(k-3)(k-2)\sqrt{7-4k+k^2}} \\ \left( \begin{array}{l} 6\sqrt{3}(k-1)(k-2)\sin\beta \\ +(24-55k+41k^2-11k^3+k^4)\cos\beta \\ +(7k-11k^2+5k^3-k^4) \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (70)$$

[0195] 其中, $\beta$ 通过模式C下的式(64)求得。

[0196] 稳态交流故障电流相角通过模式C下的式(66)求得。

[0197] 模式D:

[0198] 稳态直流故障电流平均值:

$$[0199] \quad I_{dc} = \frac{3k(1-k)U_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}} \quad (71)$$

[0200] 稳态交流故障电流幅值:

$$[0201] \quad I_{sm} = \frac{U_s}{X_{ac}} \frac{k(k-1)}{(k-2)} \left( \frac{\sqrt{3}}{4} \sin\beta + \frac{1}{4} \cos\beta + 2 \right) \quad (72)$$

[0202] 其中, $\beta$ 通过模式D下的式(64)求得。

[0203] 稳态交流故障电流相角通过模式D下的式(66)求得。

[0204] 推导步骤8:考虑交流侧电阻的稳态交、直流故障电流表达式

[0205] 交流侧阻尼的存在会使换流器交流侧电源幅值 $U_s$ 发生了变化。在稳态运行时,交

流侧三相对称,因此可以将不考虑交流侧阻尼的换流器等效成阻抗为 $Z_c$  ( $Z_c = R_c + jX_c$ ) 的三相对称负载,其等效电路如图3(a)所示。其中,换流器交流侧电压、电流相量分别为 $\dot{E}$ 、 $\dot{I}$ ,其幅值分别为 $U_s$ 、 $I_{sm}$ 。考虑交流侧阻尼的换流器可以等效为图3(b)所示的形式,此时换流器交流侧的等效电压、电流相量分别为 $\dot{E}'$ 、 $\dot{I}'$ ,其幅值分别为 $U'_s$ 、 $I'_{sm}$ 。

[0206] 基于电路分析理论,根据上述三相等效电路图可以求得更新后的稳态交流故障电流幅值和相角分别为:

$$[0207] \quad I'_{sm} = \frac{U_s}{\sqrt{(R_{ac} + R_c)^2 + X_c^2}} \quad (73)$$

$$[0208] \quad \phi' = \arctan \frac{X_c}{R_{ac} + R_c} \quad (74)$$

$$[0209] \quad \text{其中, } R_c = \frac{U_s \cos \phi}{I_{sm}}, \quad X_c = \frac{U_s \sin \phi}{I_{sm}}。$$

[0210] 更新后的交流侧电源幅值为:

$$[0211] \quad U'_s = \sqrt{\left(U_s - R_{ac} I'_{sm} \cos(\phi')\right)^2 + \left(R_{ac} I'_{sm} \sin(\phi')\right)^2} \quad (75)$$

[0212] 则考虑交流侧电阻的稳态直流故障电流可以通过将推导得出的表达式中的 $U_s$ 替换为新的交流电源幅值 $U'_s$ 求得。

[0213] 通过上述8个步骤,得到了考虑交流侧电阻的MMC的稳态交、直流故障电流表达式。

[0214] 3 MMC稳态交、直流故障电流计算流程

[0215] 上一节中得出了各个模式下的稳态交、直流故障电流解析表达,但在计算之前,还需要确定换流器所处的工作模式。为此,令各相邻模式下的直流故障电流相等,可求得各模式的分界电阻为:

$$[0216] \quad \begin{cases} R_{A/B} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{9(1+k)}{(3-4k+k^2)} \\ R_{B/C} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(k^2-3k)\left((k-2)\sqrt{9+3k^2} + 3\sqrt{7-4k+k^2}\right)}{(k^2-1)\left(\sqrt{9+3k^2} - k\sqrt{7-4k+k^2}\right)} \\ R_{C/D} = \frac{X_{ac}}{\pi} \frac{(2k-k^2)\left(\sqrt{7-4k+k^2} - 3+k\right)}{(k-1)\left(\sqrt{7-4k+k^2} - 1-k\right)} \end{cases} \quad (76)$$

[0217] 根据直流侧电阻和临界电阻的大小可以确定工作模式,紧接着可利用各工作模式下的故障电流解析表达式进行计算,图4为本发明实施例提供的一种MMC交、直流侧稳态故障电流计算流程图,总体的计算流程如下:

[0218] 1) 输入MMC参数 $k, U_s, X_{ac}, R_{ac}, R_{dc}$ , 根据式(76)计算临界电阻;

[0219] 2) 根据临界电阻值确定MMC所处的工作模式:当直流侧电阻满足 $R_{A/B} \leq R_{dc}$ 时,MMC处于模式A;当直流侧电阻满足 $R_{B/C} \leq R_{dc} \leq R_{A/B}$ 时,MMC处于模式B;当直流侧电阻满足 $R_{C/D} \leq R_{dc}$

$\leq R_{B/C}$ 时, MMC处于模式C;当直流侧电阻满足 $0 \leq R_{dc} \leq R_{C/D}$ 时, MMC处于模式D;

[0220] 3) 计算不考虑交流侧电阻时的稳态直流故障电流 $I_{dc}$ :模式A采用式(67),模式B采用式(63),模式C采用式(69),模式D采用式(71)。

[0221] 4) 根据直流电流计算不考虑交流侧电阻时的导通重叠角 $\beta$ :模式A导通重叠角为零,模式B、C、D的相角通过对应推导过程中的式(64)求得。

[0222] 5) 根据直流电流和导通重叠角计算不考虑交流侧电阻时的稳态交流故障电流幅值 $I_{sm}$ 和相角 $\varphi$ :模式A采用式(68)、(66),模式B采用式(67)、(66),模式C采用式(70)、(66),模式D采用式(72)、(66)。

[0223] 6) 根据前述步骤的结果计算考虑交流侧电阻时的稳态交流故障电流幅值 $I'_{sm}$ 、相角 $\varphi'$ 以及更新后的电源幅值 $U'_s$ :式(73)、(74)和(75)。

[0224] 7) 通过将式(67)、式(63)、式(69)、式(71)的 $U_s$ 替换为新的交流电源幅值 $U'_s$ 分别求得计算考虑交流侧电阻时模式A、B、C、D的稳态直流故障电流。

[0225] 在工作模式A下:

[0226] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流为:

$$[0227] \quad I_{dc} = \frac{9\sqrt{3}(1-k)U'_s}{2\sqrt{(9X_{ac})^2 + (\sqrt{3}(1-k)\pi R_{dc})^2}} .$$

[0228] 在工作模式B下:

[0229] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流为:

$$[0230] \quad I_{dc} = \frac{3\sqrt{3}(1-k)\sqrt{3+k^2}U'_s}{3X_{ac}(3-k) + \pi R_{dc}(1-k^2)}$$

[0231] 在工作模式C下:

[0232] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流为:

$$[0233] \quad I_{dc} = \frac{3(1-k)k\sqrt{7-4k+k^2}U'_s}{k(6-5k+k^2)X_{ac} + (1-k^2)\pi R_{dc}}$$

[0234] 在工作模式D下:

[0235] 考虑交流侧电阻时稳态直流故障电流为:

$$[0236] \quad I_{dc} = \frac{3k(1-k)U'_s}{k(2-k)X_{ac} + (1-k)\pi R_{dc}}$$

[0237] 4结果验证

[0238] 验证所采用的换流器参数如表1所示。图5对比了不同故障距离下,应用本发明得到的稳态故障电流计算结果、仿真得到的结果以及采用换流器外特性法得到的结果。图6对比了不同交流侧R/X下,应用本发明得到的稳态故障电流计算结果、仿真得到的结果以及采用换流器外特性法得到的结果。

[0239] 表1验证所采用的换流器参数默认值表

项目	参数	取值	项目	参数	取值
交流电网	额定电压	10.5kV	换流器	额定有功功率	20MW
	短路比	5		桥臂电感	3.5mH
	X/R	0.5	直流侧	直流电压	±10kV
换流变	连接方式	Dyn11		直流线路总长	11km
	容量	24MVA		直流线路等效电阻	0.0773ohm/km
	变比	10.5/10.5kV		直流线路等效电感	0.03578mH/km
	漏抗	0.1p.u.			

[0241] 综上所述,应用本发明实施例的方法能够同时获得模块化MMC稳态阶段交流侧和值侧的故障电流;计算精度高,计算过程简单,不需要额外的迭代算法;能够适应交流侧电网阻尼较大的场景;提供的解析表达式能够反映系统参数和稳态故障电流的内在关系。

[0242] 本发明实施例提出了一种精度更高、适用性更强的MMC稳态故障电流实用解析计算方法,可以同时求解出故障稳态阶段的交流故障电流和直流故障电流幅值,提升现有MMC稳态故障电流计算精度和适用性,通过提供故障电流的解析表达式,简化计算流程,并反映系统参数与故障电流水平的内在关系,可以为基于MMC的柔性直流电网故障电流计算标准的制定提供参考。

[0243] 本领域普通技术人员可以理解:附图只是一个实施例的示意图,附图中的模块或流程并不一定是实施本发明所必须的。

[0244] 通过以上的实施方式的描述可知,本领域的技术人员可以清楚地了解到本发明可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0245] 本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述,各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处。尤其,对于装置或系统实施例而言,由于其基本相似于方法实施例,所以描述得比较简单,相关之处参见方法实施例的部分说明即可。以上所描述的装置及系统实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0246] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明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发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

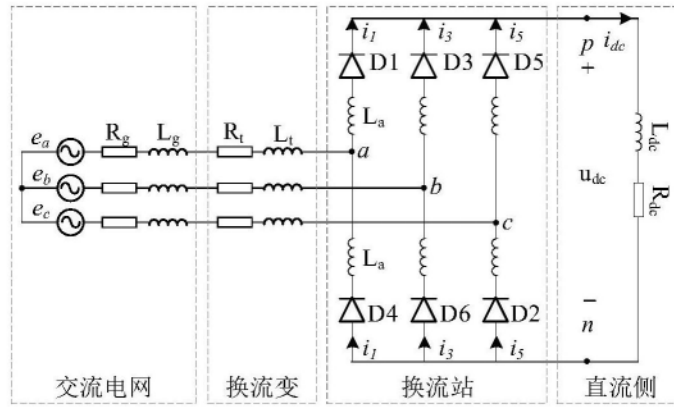


图1

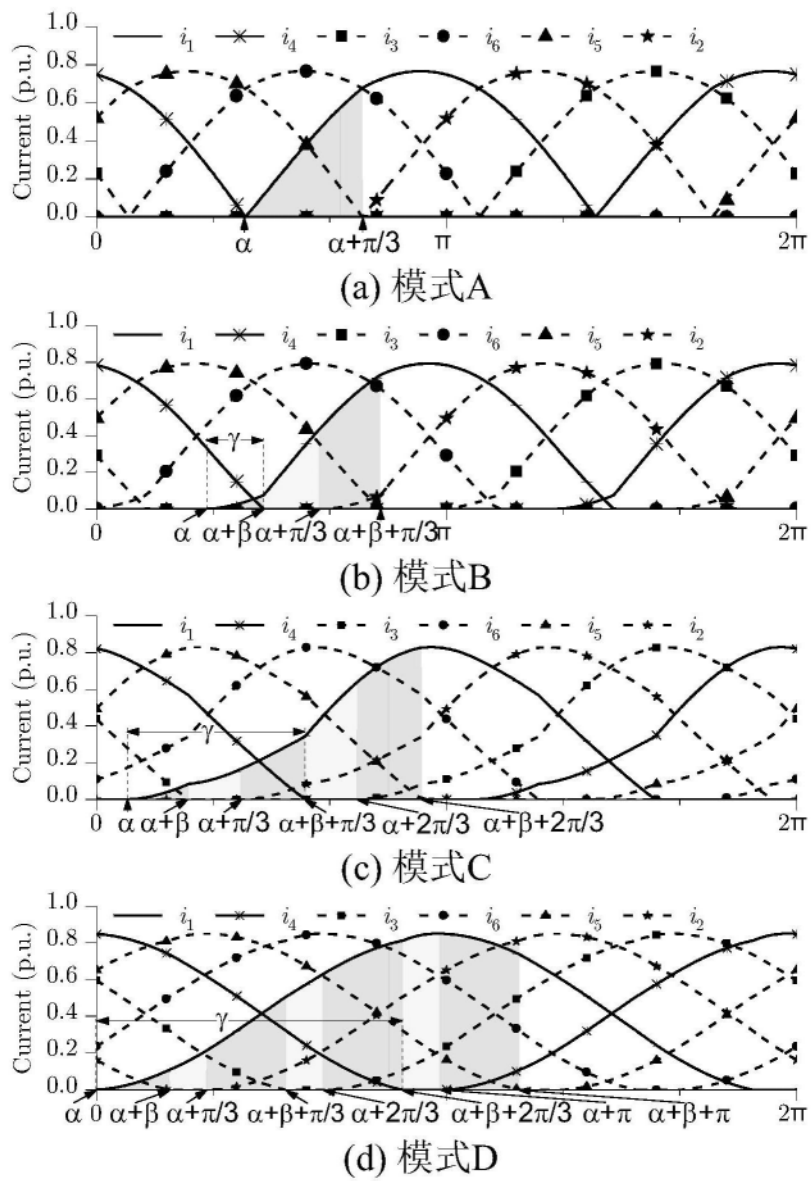
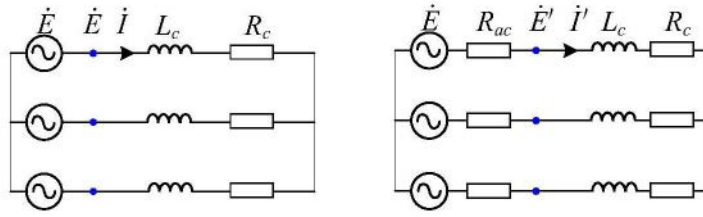


图2



(a) 不考虑交流侧电阻

(b) 考虑交流电阻

图3

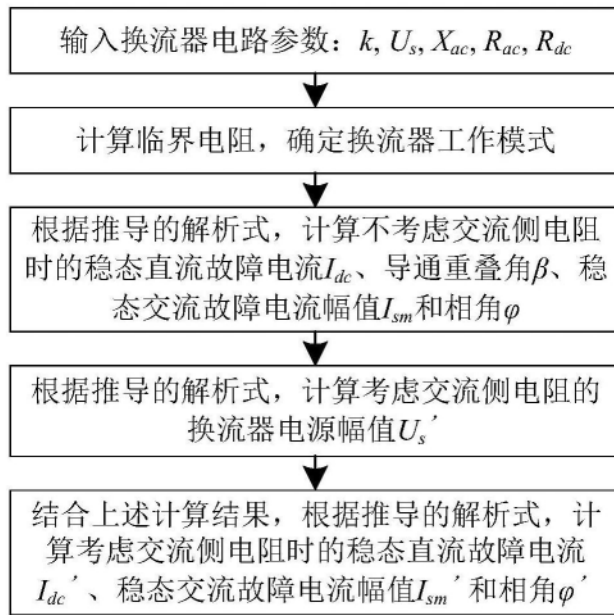


图4

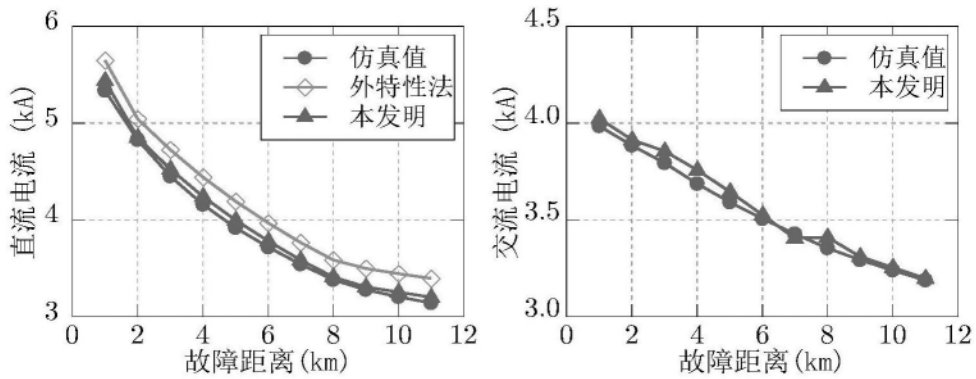


图5



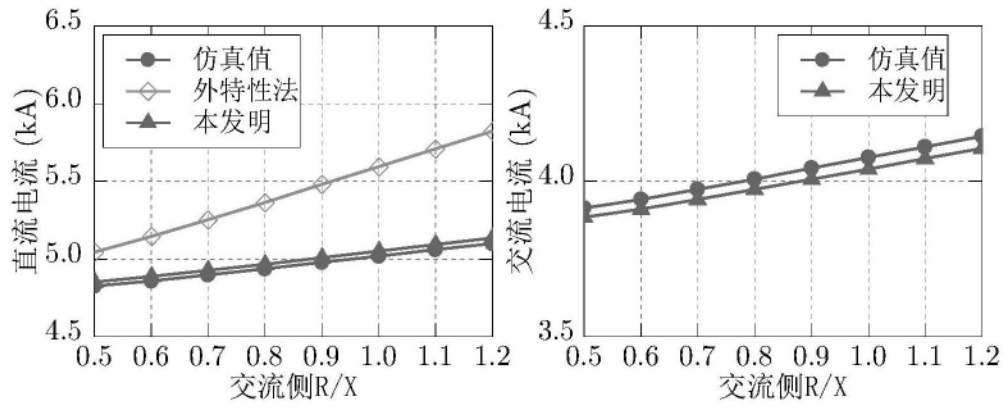


图6