

应用牛顿法的高压直流输电系统 非特征谐波潮流算法

蒋国顺¹, 李建华¹, 夏道止¹, 黄莹²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 南方电网技术研究中心, 510623, 广州)

摘要: 针对高压直流输电系统非特征谐波潮流算法中非线性方程组具有变量多、维数高的特点, 采用牛顿-拉夫逊算法迭代求解, 提高了非特征谐波算法的收敛性, 推导了换流装置交流侧三相电流和直流侧电压及 Y、d 换流变压器 Δ 绕组内零序环流的解析式. 根据交、直流网络与换流装置的相互关系, 组成换流站母线三相谐波电流平衡方程、直流网络谐波电流平衡方程, 形成了修正方程式, 以统一基波和特征谐波潮流结果为初值, 运用牛顿-拉夫逊算法迭代求解全系统非线性方程组. 采用该算法计算了南方电网云广 ± 800 kV 特高压直流输电系统非特征谐波潮流, 计算结果合理, 收敛性良好, 证明了所提算法的正确性和有效性.

关键词: 高压直流输电; 非特征谐波潮流算法; 牛顿-拉夫逊算法

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)06-0104-07

Non-Characteristic Harmonic Load Flow Algorithm Based on Newton-Raphson Method for High Voltage Direct Current System

JIANG Guoshun¹, LI Jianhua¹, XIA Daozhi¹, HUANG Ying²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China)

Abstract: In the non-characteristic harmonic load flow algorithm for high voltage direct current (HVDC) system, the nonlinear equations are characterized by the multivariable and huge dimension. Newton-Raphson iterative method is applied to improve the convergence of the non-characteristic harmonic load flow algorithm. The analytic expressions of three phases AC current, DC voltage, and circulation current at Δ side in Y, d transformer are deduced. According to the relationship between the AC-DC network and converter device, balance equations of three-phase harmonic current of AC bus and DC network harmonic current are deduced, the modified equation for whole system is hence constructed and solved iteratively by taking the unified fundamental and characteristic harmonic load flow as the initial value. The non-characteristic harmonic load flows of China Southern Power Grid Yunguang ± 800 kV UHVDC transmission system are evaluated to verify the reasonableness and effectiveness.

Keywords: high voltage direct current; non-characteristic harmonic load flow algorithm; Newton-Raphson iterative method

随着特高压直流输电线路的快速发展, 换流装置产生的谐波问题又成为研究热点. 当换流站交流

母线电压不对称、换流变压器三相参数不等,以及由于直流控制系统的不完善,使得换流阀的触发脉冲间隔不完全相等时,在直流输电交流侧和直流侧都会出现除特征谐波外的非特征谐波^[1-2],准确地计算非特征谐波对滤波器设计及抑制通信干扰等方面均有很大的实际意义。

目前,国内外谐波分析与计算主要以经典方法、调制理论分析法、谐波域分析法(HDA)^[3]为主。这些计算方法均存在不同的缺点:如数学模型不够完善,不能全面地计算3种不对称因素同时存在情况下产生的非特征谐波;经典方法做了许多简化假设,不考虑交、直流侧的相互影响,造成计算结果不准确;谐波域分析等方法中系统的方程组维数较高,可导致维数灾问题。

交、直流输电系统统一基波和谐波潮流的计算方法^[4]是20世纪80年代提出的一种高精度的谐波计算方法。在建立换流器的数学模型时,考虑到其交流侧存在谐波电压及直流侧存在谐波电流,从而建立一个比较完整的换流器数学模型,然后将它与交流系统和直流网络的数学模型一起联立求解。模型直接模拟了换流装置的非线性特性,并考虑了交、直流系统中谐波电压和谐波电流通过交、直流网络而形成的相互影响,建立更完整的交、直流系统谐波分析模型,从而系统地解决了交、直流输电系统的特征谐波计算问题。由于在非特征谐波计算中考虑因素比较多且需三相计算,复杂程度及计算规模剧增,因此当时在非特征谐波潮流算法中采用了高斯-塞德尔法求解全系统的非线性方程^[5-7]。然而,在实际的应用过程中发现,在考虑较大的不对称因素时,高斯-塞德尔法不易收敛,限制了该方法的应用。针对这一问题,本文采用牛顿-拉夫逊法求解系统非线性方程组,以提高算法的收敛性。

应用牛顿-拉夫逊法求解非线性方程组的关键点是建立修正方程式、确定初始值及雅可比矩阵各元素的求解。

1 换流装置的数学模型

在非特征谐波计算中换流装置的数学模型沿用文献^[5,7]中建立的模型。模型解析式以换流站交流母线三相电压,直流电流和Y、d换流变压器Δ中零序环流为变量。下面,以图1所示变压器为Y、d接线方式的换流装置介绍其数学模型。

与零序换流相对应的各绕组零序基波自阻抗分别用 R_{0a} 、 X_{0a} 、 R_{0b} 、 X_{0b} 、 R_{0c} 、 X_{0c} 表示(图1中未标

出)。

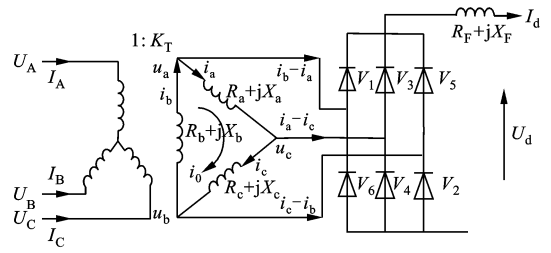


图1 变压器接线方式为Y、d的换流装置的数学模型

为求解换流桥的谐波电流,先给定触发脉冲序列 $[\alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(6)}]$,包含谐波电压的交流侧三相电压 U_A 、 U_B 、 U_C ,包含谐波电流的直流侧电流 I_d 及零序环流 I_0

$$\left. \begin{aligned} U_A &= \sum_{n=1}^N U_{An} \sin(nt + \theta_{An}) \\ U_B &= \sum_{n=1}^N U_{Bn} \sin(nt + \theta_{Bn}) \\ U_C &= \sum_{n=1}^N U_{Cn} \sin(nt + \theta_{Cn}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$I_d = I_{d0} + \sum_{n=1}^N I_{dn} \sin(nt + \phi_{dn}) \quad (2)$$

$$I_0 = I_{00} + \sum_{n=1}^N I_{0n} \sin(nt + \eta_{0n}) \quad (3)$$

由图1知换流变压器两侧电压、电流关系为

$$\left. \begin{aligned} u_{ca} &= K_T U_A - R_a i_a - R_{0a} I_0 - X_a \frac{di_a}{dt} - X_{0a} \frac{dI_0}{dt} \\ u_{ab} &= K_T U_B - R_b i_b - R_{0b} I_0 - X_b \frac{di_b}{dt} - X_{0b} \frac{dI_0}{dt} \\ u_{bc} &= K_T U_C - R_c i_c - R_{0c} I_0 - X_c \frac{di_c}{dt} - X_{0c} \frac{dI_0}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} I_A &= K_T i_a \\ I_B &= K_T i_b \\ I_C &= K_T i_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据换流装置工作特性,需分为换相期间和导通期间两个时间段来分析。

1.1 换相期间

根据换相期间 $t = [\alpha^{(i)}, \gamma^{(i)}]$ (α 为晶闸管触发导通时间, γ 为换相结束期间),换流器等效电路的回路电压和节点电流方程,并结合换流变压器两侧电压、电压关系,可得到如下的微分方程式

$$R_P i_p + X_p \frac{di_p}{dt} = K_T U_P - R_{0p} I_0 - X_{0p} \frac{dI_0}{dt} \quad (6)$$

$$U_d = -(-1)^{(i)} K_T U_Q - R_2 I_d - X_2 \frac{dI_d}{dt} +$$

$$(-1)^{(i)} \left[R_{0q} I_0 + X_{0q} \frac{dI_0}{dt} - R_1 i_p - X_1 \frac{di_p}{dt} \right] \quad (7)$$

式中: $R_1 = \frac{1}{2} R_q$; $X_1 = \frac{1}{2} X_q$; $R_2 = R_F + \frac{1}{2} R_q$; $X_2 = X_F + \frac{1}{2} X_q$.

为了统一标识6个触发脉冲间隔换流装置电流、电压关系,引入了 P, Q, R 和 p, q, r 分别表示A、B、C和a、b、c三相,其对应关系见表1.

表1 下标的对应关系

触发脉冲序列	p	q	r	P	Q	R
1,4	a	b	c	A	B	C
2,5	c	a	b	C	A	B
3,6	b	c	a	B	C	A

求式(6)、式(7),可得交流侧三相电流和直流侧电压的解析表达式.

三相电流的解析表达式^[1,8]为

$$\left. \begin{aligned} i_p^{(i,1)} &= K_i \exp[-\lambda_i(t - \alpha^{(i)})] + \\ &K_T \sum_{n=1}^N \frac{U_{pn}}{Z_{np}^{(i)}} \sin(nt + \delta_{pn} - \theta_{np}^{(i)}) - \frac{I_{00} R_{0p}}{R_p} - \\ &K_T \sum_{n=1}^N \frac{Z_{0np}^{(i)} I_{0n}}{Z_{np}^{(i)}} \sin(nt + \eta_{0n} - \theta_{np}^{(i)} + \theta_{0np}^{(i)}) \\ i_q^{(i,1)} &= -\frac{1}{2} [(-1)^i I_d + i_p^{(i,1)}] \\ i_r^{(i,1)} &= \frac{1}{2} [(-1)^i I_d - i_p^{(i,1)}] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: K_i 为第 i 个脉冲的微分方程的自由分量系数; $\lambda_i = -R_p/X_p$ 为第 i 个脉冲的微分方程的自由分量衰减时间常数; $Z_{np}^{(i)} \exp[j\theta_{np}^{(i)}] = R_p + jnX_p$; $Z_{0pn}^{(i)} \exp[j\theta_{0pn}^{(i)}] = R_{0p} + jnX_{0pn}$.

直流电压解析式为

$$\begin{aligned} U_d^{(i,1)} &= -(-1)^i K_T U_q + (-1)^i R_{0q} I_{00} - \\ &R_2 I_{d0} + (-1)^i \frac{I_{00} R_{0p} R_1}{R_p} - \\ &(-1)^i K_i \left(R_1 - X_1 \frac{R_p}{X_p} \right) \exp[-\lambda_i(t - \alpha^{(i)})] - \\ &(-1)^i K_T \sum_{n=1}^N \frac{U_{pn} Z_{R1}^{(i)}}{Z_{np}^{(i)}} \sin(nt + \delta_{pn} - \theta_{np}^{(i)} + \theta_{nR1}^{(i)}) + \\ &(-1)^i \sum_{n=1}^N I_{0n} Z_{0qn}^{(i)} \sin(nt + \eta_{0n} + \theta_{0qn}^{(i)}) + \\ &(-1)^i \sum_{n=1}^N \frac{I_{0n} Z_{0pn}^{(i)} Z_{R1}^{(i)}}{Z_{np}^{(i)}} \sin(nt + \eta_{0n} + \theta_{0np}^{(i)} - \theta_{np}^{(i)} + \\ &\theta_{nR1}^{(i)}) - \sum_{n=1}^N I_{dn} Z_{R2}^{(i)} \sin(nt + \phi_{dn} + \theta_{nR2}^{(i)}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} Z_{nR1}^{(i)} \exp[j\theta_{nR1}^{(i)}] &= R_1 + jnX_1 \\ Z_{0qn}^{(i)} \exp[j\theta_{0qn}^{(i)}] &= R_{0q} + jnX_{0q} \\ Z_{nR2}^{(i)} \exp[j\theta_{nR2}^{(i)}] &= R_2 + jnX_2 \end{aligned}$$

由换相时触发导通和换相结束时刻的边界条件组成非线性方程组 $\mathbf{F} = [f_1, f_2]^T$, 应用牛顿-拉夫逊法求得式(8)、式(9)中的待定系数 $\mathbf{X} = [K_i, \gamma^{(i)}]$

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= i_p^{(i,1)}(\alpha^{(i)}, K_i) + \frac{1}{3}(-1)^i I_d(\alpha^{(i)}) = 0 \\ f_2 &= i_p^{(i,1)}(\alpha^{(i)}, \gamma^{(i)}, K_i) - \frac{1}{3}(-1)^i I_d(\gamma^{(i)}) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

1.2 导通期间

换相结束后电路进入导通期间 $t = [\gamma^{(i)}, \alpha^{(i+1)}]$, 换流装置等效电路三相电流和直流电压的解析式为

$$\left. \begin{aligned} i_p^{(i,2)} &= \frac{1}{3}(-1)^i I_d \\ i_q^{(i,2)} &= -\frac{2}{3}(-1)^i I_d \\ i_r^{(i,2)} &= \frac{1}{3}(-1)^i I_d \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_d^{(i,2)} &= -(-1)^i K_T U_q + (-1)^i R_{0q} I_{00} - R_3 I_{d0} + \\ &(-1)^i \sum_{n=1}^N I_{0n} Z_{0qn}^{(i)} \sin(nt + \eta_{0n} + \theta_{0qn}^{(i)}) - \\ &\sum_{n=1}^N I_{dn} Z_{R3}^{(i)} \sin(nt + \phi_n + \theta_{nR3}^{(i)}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $R_3 = \frac{1}{3}(3R_F + 2R_q)$; $Z_{nR3}^{(i)} \exp[j\theta_{nR3}^{(i)}] = R_3 + jnX_3$, $X_3 = \frac{1}{3}(3X_F + 2X_q)$.

1.3 零序环流

换流变压器 Δ 侧无论换流装置工作在哪个脉冲间隔,也无论是换相期间还是非换相期间,都是一个闭合回路

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} = 0 \quad (13)$$

将变压器两侧电压关系式(4)代入式(13),可得

$$\begin{aligned} R_0 I_0 + X_0 \frac{dI_0}{dt} &= -[(R_p + X_p \frac{d}{dt})i_p + \\ &(R_q + X_q \frac{d}{dt})i_q + (R_r + X_r \frac{d}{dt})i_r] \end{aligned} \quad (14)$$

将换相期间三相电流解析式(8)代入式(14),求解得到换相期间的零序环流的表达式,将导通期间三相电流解析式(11)代入式(14),求解得到导通期间的零序环流的表达式. 零序环流表达式较复杂,此处不再列出其详细公式^[8].

1.4 傅里叶级数分解

在求得三相电流、直流电压和零序环流的解析

式之后,就可以通过傅里叶级数分解求得各次谐波分量。例如,三相电流各次谐波分量实部为

$$I_{jARl} = \frac{K_T}{\pi} \left[\int_{\alpha^{(1)}}^{\gamma^{(1)}} i_p^{(1,1)} \sin(lt) dt + \int_{\gamma^{(1)}}^{\alpha^{(2)}} i_p^{(1,2)} \sin(lt) dt + \int_{\alpha^{(2)}}^{\gamma^{(2)}} i_q^{(2,1)} \sin(lt) dt + \int_{\gamma^{(2)}}^{\alpha^{(3)}} i_q^{(2,2)} \sin(lt) dt + \int_{\alpha^{(3)}}^{\gamma^{(3)}} i_r^{(3,1)} \sin(lt) dt + \int_{\gamma^{(3)}}^{\alpha^{(4)}} i_r^{(3,2)} \sin(lt) dt + \dots \right] \quad (15)$$

2 系统非线性方程组

在按式(1)~式(3)分别给定换流装置交流母线(AD节点)三相电压 U_A 、 U_B 、 U_C ,直流侧电流 I_d ,零序环流 I_0 后,由上述方法可以得出交流三相电流和直流电压的解析表达式,并对其进行傅里叶级数分解,得到了换流装置注入交流系统的各次谐波电流和直流侧各次谐波电压。然而, U_A 、 U_B 、 U_C 、 I_d 、 I_0 中的各个谐波分量初值不可能准确给定,它们需要在交、直流系统方程中不断迭代修正,因此必须分别建立交、直流侧的系统方程。

2.1 交流系统方程

交流系统中的元件包括交流线路、变压器、补偿装置、同步电机、综合负荷,它们各自的谐波参数和等值电路见参考文献[1]。

由交流系统决定的某个AD节点谐波电流应当等于这个节点上所有换流装置注入交流系统的谐波电流之和,即

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{iAn} + \sum_{j \in i} \dot{I}_{jAn} &= 0 \\ \dot{I}_{iBn} + \sum_{j \in i} \dot{I}_{jBn} &= 0 \\ \dot{I}_{iCn} + \sum_{j \in i} \dot{I}_{jCn} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: i 为AD节点编号; j 为换流器的编号; $\dot{I}_{jAn}$ 为第 j 个换流器注入交流系统A相的 n 次谐波电流,

其实部计算方法如式(15)所示; $\dot{I}_{iAn}$ 为第 i 个AD节点的 n 次谐波电流,它由交流网络谐波导纳矩阵和AD节点各次谐波电压决定。

2.2 直流系统方程

每极电压、电流存在如下关系

$$\dot{U}_{dr(n)}^Z = \sum_{j=1}^s \dot{U}_{dj(n)}^Z; \dot{U}_{dr(n)}^I = \sum_{j=1}^s \dot{U}_{dj(n)}^I \quad (17)$$

$$\dot{I}_{ij(n)}^Z = \dot{I}_{i(n)}^Z; \dot{I}_{ij(n)}^I = \dot{I}_{i(n)}^I \quad (18)$$

直流网络电压电流方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{d1(n)}^Z \\ -\dot{I}_{d2(n)}^Z \\ -\dot{I}_{d1(n)}^I \\ \dot{I}_{d2(n)}^I \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_{d(n)} \begin{bmatrix} \dot{U}_{d1(n)}^Z \\ -\dot{U}_{d2(n)}^Z \\ -\dot{U}_{d1(n)}^I \\ \dot{U}_{d2(n)}^I \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

式中:上标Z代表整流侧,I代表逆变侧; s 为换流器数; $\mathbf{Y}_{d(n)}$ 为直流导纳矩阵。

2.3 形成修正方程式

式(16)~式(19)组成了全系统非线性方程组,修正变量为AD节点三相谐波电压和直流系统每侧每极谐波电流分量幅值和相位,当交、直流系统电流、电压谐波截断次数相同时,方程数与变量数相等。

综上所述,由 I_A 、 I_B 、 I_C 和 U_d 的误差方程式组成了一组由各次交流母线三相电压和直流侧各次谐波电流为变量的非线性方程组。对这组方程求导,得出相应的雅可比矩阵各元素,进而求解出各修正变量,这是该方法的关键。有了各方程的具体表达式,可求得雅可比矩阵的各元素。需要注意的是 I_A 、 I_B 、 I_C 、 U_d 解析式中的 $\mathbf{X}=[K_i, \gamma^{(i)}]$ 与修正变量 U_A 、 U_B 、 U_C 、 I_d 之间服从式(10)的约束关系, I_A 、 I_B 、 I_C 、 U_d 与修正变量之间有隐函数关系,因此对方程中的变量求导,部分是间接的隐函数,增加了形成雅可比矩阵的难度。由于在非特征谐波的计算中考虑的是三相,且为各次谐波,得到节点三相谐波电流平衡方程写成直角坐标形式后的交流侧方程个数为 $6N_{AD}(N-1)$ (N_{AD} 为AD节点数, N 为谐波次数,一般考虑到50次);将直流网络方程每侧每极电流写成直角坐标形式后方程的个数为 $4NO_p$ (O_p 为直流系统的极数)。可见,在非特征谐波计算中,雅可比矩阵阶数是很高的。雅可比矩阵各元素的具体求解方法见文献[8],元素的组成如下

$$\left. \begin{aligned} \left[\frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{U}_Q} \right]_{\text{D}} &= \frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{U}_Q} + \frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{U}_Q} \\ &\vdots \\ \left[\frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{I}_d} \right]_{\text{D}} &= \frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{I}_d} + \frac{\partial \mathbf{I}_P}{\partial \mathbf{I}_d} \\ &\vdots \\ \left[\frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{U}_P} \right]_{\text{D}} &= \frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{U}_P} + \frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{U}_P} \\ &\vdots \\ \left[\frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{I}_d} \right]_{\text{D}} &= \frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{I}_d} + \frac{\partial \mathbf{U}_d}{\partial \mathbf{I}_d} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: D 是为了区别等号左侧全导数与右侧第二部分的直接偏导.

2.4 程序流程图

各修正量中的特征谐波分量由统一基波和特征谐波潮流计算结果确定,其他各非特征谐波分量初值均假设为0.全系统非线性方程组和换流装置方程式交替使用牛顿-拉夫逊法求解,对于其中的零序环流采用简单迭代法同步求解.该算法整个流程如图2所示.

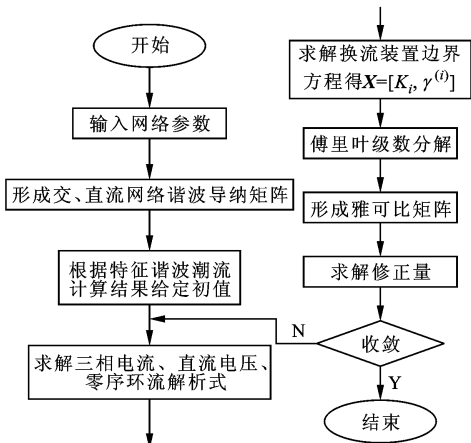


图2 程序流程

3 算例分析

以云广±800 kV特高压直流输电系统为例,其线路的额定电压为±800 kV,额定电流为3 125 A,额定输送容量为5 000 MW,输电距离为1 438 km.

3.1 算法的验证

对该算法可靠性进行了两个方面的验证.
(1)假设3种不对称量为0,用非特征谐波潮流程序计算特征谐波潮流,其结果应与特征谐波潮流程序^[1,9]计算结果基本一致,结果如表2所示.

表2 云南侧交流特征谐波计算结果

谐波次数	特征谐波		非特征谐波	
	幅值/A	相位/(°)	幅值/A	相位/(°)
11	224.39	-47.26	224.67	-47.38
13	146.68	-143.60	146.91	-143.72
23	60.09	-83.89	60.13	-84.20
25	51.05	173.20	51.09	172.88
35	19.72	-126.76	19.60	-127.08
37	18.50	128.85	18.38	128.53
47	5.66	-136.20	5.61	-134.70
49	5.59	110.91	5.52	112.59

(2)为与文献[10]交流谐波电流的计算结果(见图3)对比,按文献[10]的条件,对云广直流输电系统做了理想化处理后,得出非特征谐波的分布变化规律,再与文献[10]中给出的规律对比.当变压器三相漏抗变化量为±10%时,奇次非特征谐波电流的变化规律如图4所示,图3、图4中曲线上数值均为谐波次数,谐波电流为标么值.

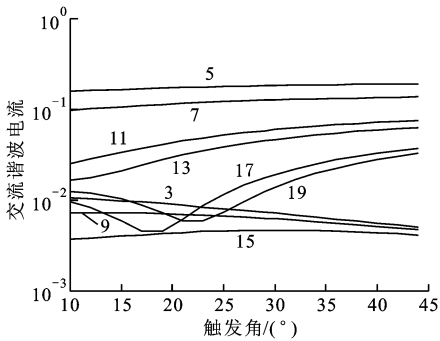


图3 文献[10]的谐波电流计算结果

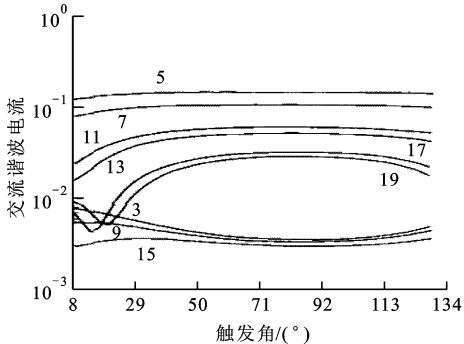


图4 本文程序谐波电流的计算结果

从以上两方面对比结果可以看出,本算法的计算结果是可靠的.

3.2 计算云广直流输电系统的非特征谐波

同时考虑3种不对称因素,交流母线含0.5%的基波负序电压,变压器三相参数偏差为±5%,触发脉冲间隔偏差为0.25°.在正常双极无滤波器的运行条件下,非特征谐波计算结果如表3、表4所示.

表3、表4中交流侧和直流侧均出现了各次谐波分量,而且某些非特征谐波量增加较多,这与3种不对称因素关系很大.在这些谐波分量中,主要成分仍是交流侧的11、13次以及直流侧的12次特征谐波分量.由理论分析可知^[1],换流站交流母线电压不对称和换流变压器三相参数不对称使三相电流中出现各奇次非特征谐波,直流侧将出现各偶次非特征

谐波,触发脉冲间隔不等时交、直流侧都包含所有的奇次、偶次谐波^[6].当 3 种不对称因素都考虑时,各次谐波均出现,表 3、表 4 计算结果与上述规律相符.程序的迭代过程如表 5 所示.

整个迭代过程为带参数的牛顿-拉夫逊迭代过程,25~27 次迭代过程体现出了平方收敛的特性.

表 3 注入交流系统的非特征谐波电流

谐波 次数	云南侧非特征谐波电流/A			广东侧非特征谐波电流/A		
	A	B	C	A	B	C
2	16.88	17.27	18.01	23.34	25.2	24.81
3	31.81	102.29	89.84	29.95	71.49	65.41
4	8.61	8.25	7.44	24.35	24.19	23.67
5	37.44	37.62	38.66	17.42	13.32	16.02
6	0.61	0.57	0.26	2.46	0.99	0.86
7	29.9	28.79	29.45	11.22	13.76	13.8
8	2.96	2.68	2.53	17.99	18.23	19.93
9	19.53	12.43	24.84	23.45	24.12	42.83
10	2.19	1.98	2.51	15.59	13.99	13.68
11	220.27	207.23	210.99	269.29	244.64	276.45
12	0.29	0.28	0.28	0.48	2.62	2.23
13	137.77	142.69	138.41	188.42	153.43	184.74

表 4 直流线路非特征谐波电流

谐波 次数	始端电流		末端电流	
	幅值/A	相位/(°)	幅值/A	相位/(°)
1	0.289	−166.945	0.412	−128.153
2	52.364	64.586	46.513	−116.559
3	9.449	162.403	1.107	−92.679
4	20.218	−19.471	14.535	−19.944
5	0.135	−27.426	0.301	174.592
6	0.140	−102.252	0.202	−134.502
7	0.053	3.199	0.202	−16.109
8	6.606	−119.477	9.758	70.038
9	0.496	136.383	0.227	−63.935
10	0.831	97.443	1.738	153.956
11	0.024	−107.936	0.176	−77.572
12	22.922	51.676	18.608	−67.085

表 5 程序的迭代过程

迭代 次数	AD 节点电流平衡 方程最大失配量	直流网络电流平衡 方程最大失配量	最大 修正量
21	0.040 684	0.000 039	0.000 049
22	0.046 028	0.000 008	0.000 047
23	0.037 598	0.000 002	0.000 051
24	0.035 417	0.000 002	0.000 030
25	0.006 128	0.000 001	0.000 005
26	0.000 302	0.000 000	0.000 000
27	0.000 001	0.000 000	0.000 000

4 结 论

本文采用了牛顿-拉夫逊算法计算高压直流输电系统的非特征谐波.该方法克服了在考虑较大不对称因素时,高斯-塞德尔法不易收敛的问题.文中建立了适合牛顿-拉夫逊法迭代的换流装置数学模型,给出了雅可比矩阵元素的求解方法及基于牛顿-拉夫逊法的非特征谐波潮流统一算法计算程序流程.

以云广±800 kV 特高压直流输电系统为算例,程序经过验证计算,结果合理,收敛性好.同时,计算了云广±800 kV 特高压直流输电系统正常双极无滤波器运行条件下的非特征谐波潮流,计算结果合理,程序收敛性良好.

参考文献:

[1] 夏道止,沈赞坝.高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M].北京:水利电力出版社,1994:94-107.

[2] 浙江大学发电教研室直流输电教研组.直流输电[M].北京:电力出版社,1982:222-256.

[3] 史丹,任震,余涛.高压直流输电系统的谐波分析方法综述[J].电力自动化设备,2006,26(4):93-97.

SHI Dan, REN Zhen, YU Tao. Overview of harmonic analysis methods in HVDC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 93-97.

[4] 夏道止,沈赞坝,朱振青.交直流电力系统中统一基波和谐波潮流[J].西安交通大学学报,1985,19(5):11-23.

XIA Daozhi, SHEN Zanxun, ZHU Zhenqing. Unified fundamental and harmonic load flow calculation of AC/DC transmission power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1985, 19(5): 11-23.

- [5] 陈红坤. 交直流输电系统的非特征谐波分析[D]. 西安:西安交通大学,1990.
- [6] 夏道止,沈赞坝. 直流输电系统非特征谐波研究[J]. 西安交通大学学报,1985,18(2):13-22.
XIA Daozhi, SHEN Zanzun. The study of non-characteristic harmonic in DC power transmission system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1985, 18(2): 13-22.
- [7] 陈红坤. 交直流输电系统非特征谐波分析[J]. 武汉水利电力大学学报,1997,30(4):51-55.
CHEN Hongkun. Analysis of non-characteristic harmonic in AC/DC power transmission system[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1997, 30(4): 51-55.
- [8] 蒋国顺. 高压直流输电系统非特征谐波潮流统一算法的改进[D]. 西安:西安交通大学,2009.
- [9] 李战鹰,李建华,夏道止. ± 800 kV 特高压直流输电系统特征谐波分析[J]. 电网技术,2006,30(24):6-9.
LI Zhanying, LI Jianhua, XIA Daozhi. Analysis of characteristic harmonics in ± 800 kV ultra high voltage direct current power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(24):6-9.
- [10] SUBBARAO T, REEVE J. Harmonic caused by imbalance transformer impedance and imperfect twelve-pulse operation in HVDC conversion[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(5): 1732-1737.

(编辑 杜秀杰)