

电力系统不对称谐波潮流研究*

王钦仁 赵书强 刘宝仁 周 勇

(郑州工学院计算机与自动化系)

摘 要: 本文研究了电力系统不对称谐波(及基波)潮流的三相计算方法。首先,确定了电气化铁道谐波源注入电力系统谐波电流的计算公式。在此基础上,用三相 P-Q 分解法建立了电力系统不对称基波潮流计算的数学模型,提出了通过解三相线性节点方程 $[\dot{I}_n] = [\dot{Y}_n][\dot{U}_n]$ 计算电力系统谐波潮流的方法,根据本文的数学模型,作者编制了相应的计算程序,并针对河南某地区电网进行了计算,得出了较为满意的结果。

关键词: 电力系统, 谐波

随着电气化铁道(以下简称“电铁”)在我国迅速发展,其谐波与负序问题突出并影响到电力系统的安全运行,对电铁的谐波与负序问题进行分析研究已成为当前一个十分迫切的任务。在谐波的研究中,现场测试工作占有很重要的地位,但它只能提供有限的测试点在某些特定时刻的谐波值,对现在和将来系统中各监视点可能达到的数值则很难确定。所以,对电力系统的谐波潮流从理论上作出分析和研究,并提出切实可行的计算方法就成了一个重要的研究课题。电铁负荷是不对称谐波源,从国内外谐波研究成果看,目前还没有比较实用的不对称谐波潮流的计算方法与程序。本文在这方面进行了探讨,提出了自己的计算方法。

110KV 系统

1 电气化铁道谐波源

电铁中的电力机车为单相整流负荷,由 110 千伏三相电力系统供电,因为电铁谐波源是电力系统的不对称谐波电流源,所以首先要通过分析计算确定电铁谐波源注入三相电力系统中的谐波电流。目前,我国电铁大都采用主变压器为 Y/△-11 接线的 BT 供电系统,接线原理图如图 1 所示(以△侧 C

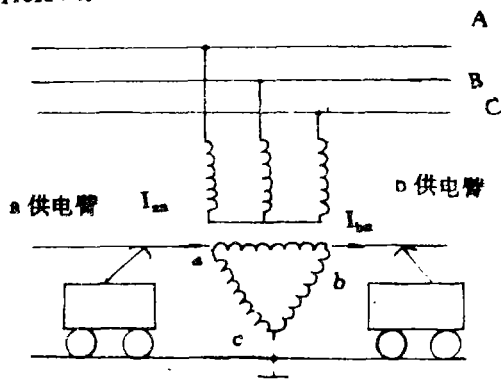


图 1 电铁牵引供电系统接线图

* 收稿日期: 1990.02.21

相接钢轨—大地为例)。

根据机车运行状况可以计算出 a、b 两个供电臂上的各次谐波电流 \dot{I}_{an} 、 $\dot{I}_{bn}^{(10)}$ 。忽略牵引变压器的激磁电流, 根据原副边绕组的安匝平衡原理, 可以计算出注入电力系统中各相的谐波电流, 即:

$$\dot{I}_{An} = \frac{\sqrt{3}}{K} \left(\frac{2}{3} \dot{I}_{an} + \frac{1}{3} \dot{I}_{bn} \right) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (1)$$

$$\dot{I}_{Bn} = \frac{\sqrt{3}}{K} \left(-\frac{1}{3} \dot{I}_{an} + \frac{1}{3} \dot{I}_{bn} \right) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2)$$

$$\dot{I}_{Cn} = \frac{\sqrt{3}}{K} \left(-\frac{1}{3} \dot{I}_{an} - \frac{2}{3} \dot{I}_{bn} \right) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (3)$$

式中: n —谐波次数;

K —牵引站主变压器变比;

\dot{I}_{an} 、 \dot{I}_{bn} —a、b 供电臂各次谐波电流;

\dot{I}_{An} 、 \dot{I}_{Bn} 、 \dot{I}_{Cn} —110 千伏侧三相各次谐波电流。

2 电力系统不对称基波潮流计算

2.1 三相节点导纳矩阵

本文对电力系统三相节点导纳矩阵进行分块处理, 使每一元素都是 3×3 阶矩阵的形式。例如, 对 i 、 j 节点间的互导纳, 有:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} G_{ij}^{aa} + jB_{ij}^{aa} & G_{ij}^{ab} + jB_{ij}^{ab} & G_{ij}^{ac} + jB_{ij}^{ac} \\ G_{ij}^{ba} + jB_{ij}^{ba} & G_{ij}^{bb} + jB_{ij}^{bb} & G_{ij}^{bc} + jB_{ij}^{bc} \\ G_{ij}^{ca} + jB_{ij}^{ca} & G_{ij}^{cb} + jB_{ij}^{cb} & G_{ij}^{cc} + jB_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

因而可形成三相 π 形等值电路如图 2 所示。

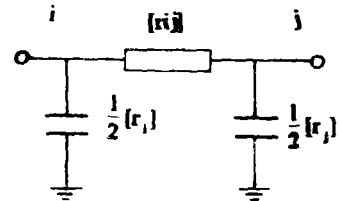


图 2 三相 π 形等值电路

2.2 变压器的三相等值电路

变压器的三相等值模型可利用其正、负、零序三组参数求得。设变压器原副边的正、负、零序互导纳分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_0 , 则三相等值模型中变压器原副边的互导纳为:

$$Y_{PS} = T \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 \\ 0 & 0 & Y_0 \end{bmatrix} T^{-1} \quad (5)$$

式中: $T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$

2.3 发电机模型

当系统的三相潮流不对称时, 发电机端节点不能当作 P-Q 节点处理, 这时需增加发电机的电势节点。增加了内电势节点后, 发电机端节点可作为注入功率为零的 P-Q 节点处理。增加内电势节点时发电机模型如图 3 所示。

2.4 牵引站的处理

对于牵引站节点, 已知的是三相基波注入电流 \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_{B1} 、 \dot{I}_{C1} , 而三相基波注入功率是未知的。设牵引站高压侧三相基波电压为 \dot{U}_{A1} 、 \dot{U}_{B1} 、 \dot{U}_{C1} , 则以 A 相为例, 注入功率可按下式计算。

$$S_{A1} = \dot{U}_{A1} \dot{I}_{A1}^* \quad (6)$$

在不对称基波潮流的迭代过程中, 牵引站电压是不断变化的, 所以每次迭代前均要计算一次牵引站的三相注入功率。

2.5 不对称基波潮流的三相 P-Q 分解算法

在分析不对称网络时, 选系统中一台发电机的端节点作为衡节点。对于 P-Q 节点, 功率平衡方程为:

$$\Delta P_i^p = P_i^p - u_i^p \sum_{j \in i} \sum_{m=1}^3 u_j^m (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}) \quad (7)$$

$$\Delta Q_i^p = Q_i^p - u_i^p \sum_{j \in i} \sum_{m=1}^3 u_j^m (G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm}) \quad (8)$$

式中: P_{is} 、 Q_{is} 分别为节点 i 的有功与无功注入;

ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 的有功与无功偏差量;

u_i 、 u_j 分别为节点 i、j 的电压;

θ_{ij} 为节点 i、j 之间的相角差;

$j \in i$ 表示 i 节点与 j 节点直接相联;

$p = 1, 2, 3$, $m = 1, 2, 3$ 分别表示 i、j 节点的 a、b、c 相。

对于内电势节点, 其三相总功率平衡方程为:

$$\Delta P_{gk} = P_{gk} - E_{gk} \sum_{p=1}^3 \sum_{j \in K} \sum_{m=1}^3 u_j^m (G_{nj}^{pm} \cos \theta_{kj}^{pm} + B_{nj}^{pm} \sin \theta_{kj}^{pm}) \quad (9)$$

式中: ΔP_{gk} 、 P_{gk} 、 E_{gk} 分别为第 K 台发电机的总功率偏差值、总功率给定值、内节点电势;

$j \in K$ 表示第 j 与第 K 台发电机内电势节点直接相联, $K = 1, 2, \dots, l$, l 为发电机内电势节点数。

对于 110 千伏及以上的高压网络, P、Q 分解后的修正方程式为:

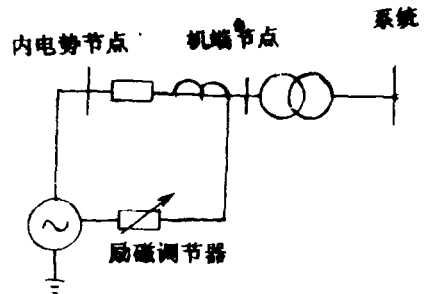


图3 增加内电势节点后的发电机模型

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 / U_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n / U_n \\ \dots \\ \Delta P_{g1} / E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta P_{gl} / E_{gl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \dots & \ddots & \dots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 U_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n U_n \\ \dots \\ \Delta \theta_{g1} E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{gl} E_{gl} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\Delta P_i / U_i = [\Delta P_i^a / U_i^a, \Delta P_i^b / U_i^b, \Delta P_i^c / U_i^c]^T$

$\Delta \theta_i U_i = [\Delta \theta_i^a U_i^a, \Delta \theta_i^b U_i^b, \Delta \theta_i^c U_i^c]^T \quad (i = 1, 2, \dots, n)$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 / U_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n / U_n \end{bmatrix} = [J_1] \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} + [J_2] \begin{bmatrix} \Delta E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta E_{gl} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\Delta Q_i / U_i = [\Delta Q_i^a / U_i^a, \Delta Q_i^b / U_i^b, \Delta Q_i^c / U_i^c]^T$

$U_i = [\Delta U_i^a, \Delta U_i^b, \Delta U_i^c]^T \quad (i = 1, 2, \dots, n)$

上两式中 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 为雅可比矩阵的相应子块。

$[J_1]$ 是一个 $n \times n$ 阶方阵, 其中任一元素为:

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} -G_{ij}^{aa} \sin \theta_{ij}^{aa} + B_{ij}^{aa} \cos \theta_{ij}^{aa} & -G_{ij}^{ab} \sin \theta_{ij}^{ab} + B_{ij}^{ab} \cos \theta_{ij}^{ab} & -G_{ij}^{ac} \sin \theta_{ij}^{ac} + B_{ij}^{ac} \cos \theta_{ij}^{ac} \\ -G_{ij}^{ba} \sin \theta_{ij}^{ba} + B_{ij}^{ba} \cos \theta_{ij}^{ba} & -G_{ij}^{bb} \sin \theta_{ij}^{bb} + B_{ij}^{bb} \cos \theta_{ij}^{bb} & -G_{ij}^{bc} \sin \theta_{ij}^{bc} + B_{ij}^{bc} \cos \theta_{ij}^{bc} \\ -G_{ij}^{ca} \sin \theta_{ij}^{ca} + B_{ij}^{ca} \cos \theta_{ij}^{ca} & -G_{ij}^{cb} \sin \theta_{ij}^{cb} + B_{ij}^{cb} \cos \theta_{ij}^{cb} & -G_{ij}^{cc} \sin \theta_{ij}^{cc} + B_{ij}^{cc} \cos \theta_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\theta_{ij}^{aa} = \theta_i^a - \theta_j^a$, $\theta_{ij}^{ab} = \theta_i^a - \theta_j^b$, 其余各角可依此类推。

$[J_2]$ 是 $n \times 1$ 阶矩阵, 如是第 K 台发电机端节点, 则对应的元素为:

$$J_{2iK} = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^3 (-G_{iK}^{am} \sin \theta_{iK}^{am} + B_{iK}^{am} \cos \theta_{iK}^{am}) \\ \sum_{m=1}^3 (-G_{iK}^{bm} \sin \theta_{iK}^{bm} + B_{iK}^{bm} \cos \theta_{iK}^{bm}) \\ \sum_{m=1}^3 (-G_{iK}^{cm} \sin \theta_{iK}^{cm} + B_{iK}^{cm} \cos \theta_{iK}^{cm}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

否则, $J_{2iK} = [0 \ 0 \ 0]^T$.

$[J_3]$ 是 $l \times n$ 阶矩阵, 如 i 是第 K 台发电机的端节点, 则对应的元素为:

$$J_{3Ki} = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^3 (-G_{Ki}^{pa} \sin \theta_{Ki}^{pa} + B_{Ki}^{pa} \cos \theta_{Ki}^{pa}) \\ \sum_{p=1}^3 (-G_{Ki}^{pb} \sin \theta_{Ki}^{pb} + B_{Ki}^{pb} \cos \theta_{Ki}^{pb}) \\ \sum_{p=1}^3 (-G_{Ki}^{pc} \sin \theta_{Ki}^{pc} + B_{Ki}^{pc} \cos \theta_{Ki}^{pc}) \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

否则,

$$J_{3Ki} = [0 \ 0 \ 0].$$

$[J_4]$ 是 $l \times l$ 阶对角阵, 其中的第 K 个对角元素为:

$$J_{4KK} = \sum_{p=1}^3 \sum_{m=1}^3 (G_{Ki}^{pm} \cos \theta_{Ki}^{pm} - B_{Ki}^{pm} \sin \theta_{Ki}^{pm}) \quad (15)$$

由(10)式可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_1 / U'_1 \\ \vdots \\ \Delta P'_n / U'_n \end{bmatrix} = [J_5] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 U_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n U_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_{g1} E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta \theta_{gl} E_{gl} \end{bmatrix} = [J_4]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{g1} / E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta P_{gl} / E_{gl} \end{bmatrix} - [J_4]^{-1} [J_3] \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 U_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n U_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

(16)式中:

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_1 / U'_1 \\ \vdots \\ \Delta P'_n / U'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 / U_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n / U_n \end{bmatrix} - [J_2][J_4]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{g1} / E_{g1} \\ \vdots \\ \Delta P_{gl} / E_{gl} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[J_5] = [J_1] - [J_2][J_4]^{-1}[J_3] \quad (19)$$

由 $[J_2]$ 、 $[J_3]$ 、 $[J_4]$ 的特点可知, $[J_5]$ 与 $[J_1]$ 稀疏形式完全一样, 而 $[J_1]$ 与节点导纳矩阵稀疏形式完全一样。这样, 用(16)式作有功功率的修正方程, 雅可比矩阵可直接利用导纳矩阵的稀疏存放形式, 这将给程序编制带来方便。另外, $[J_2]$ 、 $[J_3]$ 、 $[J_4]$ 均是具有特殊形式的矩阵, 计算(17)、(18)、(19)式并无困难。

在本文中, 认定励磁调节器维持发电机端节点正序电压不变进行调节, 则(11)式中的:

$$\Delta E_{gK} = \frac{1}{3}(\Delta u_i^a + \Delta u_i^b + \Delta u_i^c) \quad (20)$$

下标 i 为第 K 台发电机的机端节点号, $K=1, 2, \dots, 1$ 。

根据110千伏及以上高压网络的特点, 我们还可以对修正方程(10)和(11)作一些近似处理:

(1) 对于所有的 P - Q 节点, 有 $Q_i^{pp} < B_{ii}^{pp}(V_i^p)^2$;

(2) $\theta_{ij}^{pp} \approx 0^\circ$,

$G_{ij}^{pp} \sin \theta_{ij}^{pp} < B_{ii}^{pp}$;

(3) $\theta_{ii}^{pm} \approx \pm 120^\circ$,

$\theta_{ij}^{pm} \approx \pm 120^\circ$ ($p \neq m$)。

经过上述的近似处理, 可使雅可比矩阵在迭代过程中保持不变, 从而可利用因子表求解修正方程, 加快迭代速度。

电力系统不对称基波潮流计算程序框图如图4所示。

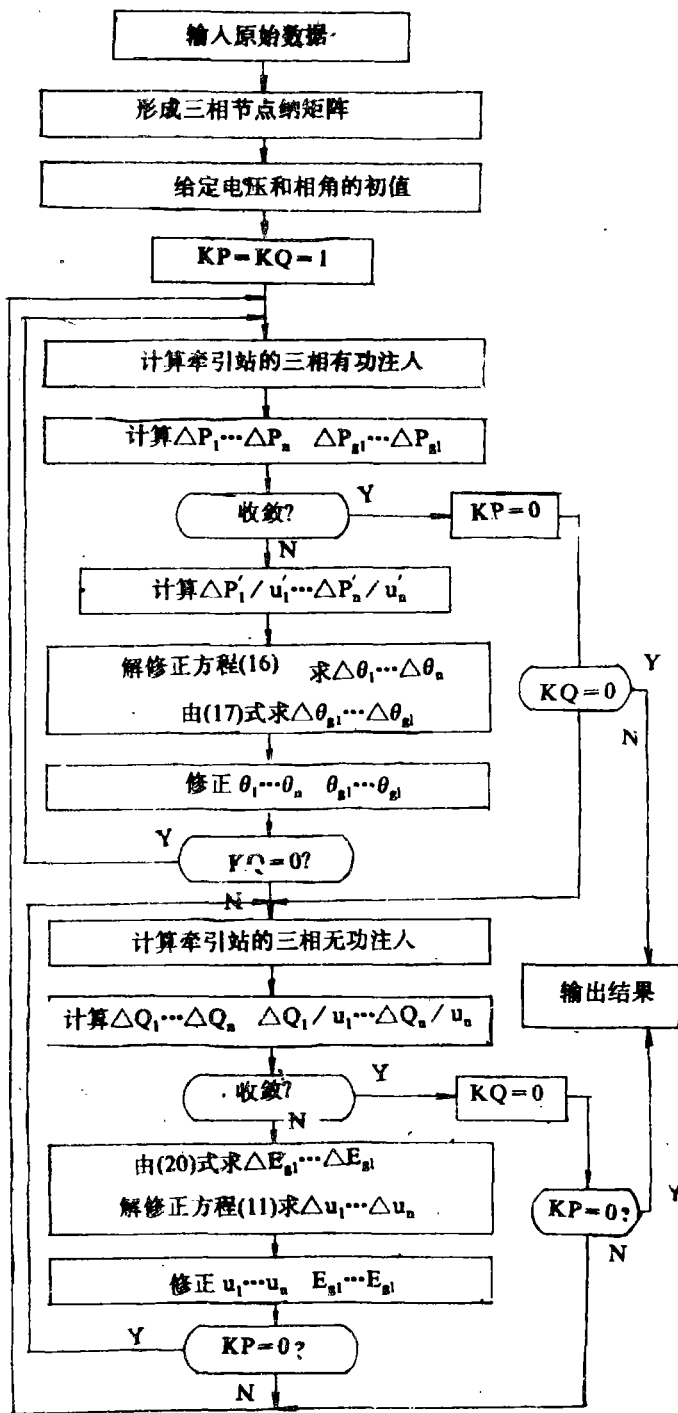


图4 电力系统不对称谐波基波潮流计算程序框图

3 电力系统不对称谐波潮流分析

分析计算不对称谐波潮流,首先需要确定电力系统的谐波网络。在谐波网络中,输电线的电阻(R_{Ln})和变压器的电阻(R_{Tn})计及集肤效应影响后的阻值分别为:

$$R_{Ln} = 0.127(\sqrt{n/R_{dc}} + 0.288)R_{dc} \quad (21)$$

$$R_{Tn} = (0.6 + 0.2/n^2 + 0.2n^{1.5})R_T \quad (22)$$

式中: R_{dc} 为每公里输电线的直流电阻;

R_T 为变压器的绕阻的基波交流电阻。

在谐波网络中,发电机及负荷均为接地支路。发电机的谐波阻抗取谐波次数与其负荷电抗的乘积。对于负荷采用并联模型,其电阻与电抗分别为:

$$R_E = \sqrt{n} \cdot U_L^2 / P_L \quad (23)$$

$$X_E = n \cdot U_L^2 / Q_L \quad (24)$$

式中: U_L 、 P_L 、 Q_L 分别为负荷节点的基波电压、有功负荷、无功负荷。

如果负荷节点接有并联补偿电容,则应在负荷的并联模型中再增加一并联电容。

依据谐波网络可形成三相谐波节点导纳矩阵。由于电铁负荷为谐波电流源,所以解三相节点方程 $[\dot{I}_n] = [Y_n][\dot{U}_n]$, 可求出系统各节点的三相谐波电压,进而可求出系统各支路的三相谐波电流。

4 算例及结论

4.1 某地区网络谐波潮流计算

该地区电力系统图如图 5 所示。其中接有一个电铁牵引站。电网向牵引站供电的方式有三种:①由 220 千伏变电站 110 千伏母线供电;②由 D 电厂 110 千伏母线供电,此时 T 接至 F 变电站的线路断开;③由 F 变电站供电,此时 D 电厂 110 千伏母线至 T 结线路断开。目前,牵引站负荷状况有三种:①a 供电臂有一台机车;②a 供电臂有两台机车;③a、b 供电臂各有一台机车。

针对向牵引站供电及牵引负荷的不同工况,我们进行了计算。限于篇幅,这里只给出由 220 千伏变电站供电, a 供电臂有一台机车运行时的计算结果,并与相同工况下的实测数据(由河南省电力试验研究所提供)相比较,如表 1 所示。表中 $I_{铁}$ 为牵引站 110 千伏侧电流; I_{Δ} 为 220 千伏变电站 110 千伏供电线路电流。

4.2 根据计算结果,可以得出如下结论:

4.2.1 本文提出的关于电力系统不对称谐波潮流的分析,即用三相模型的计算方法是合理的,所编计算程序也具有实用性。由表 1 可以看出,各相各次谐波电流的计算值和实测值是很接近的。

4.2.2 合理地设计和调度电力系统对牵引站的供电方式,合理安排电力机车的运行方式,可以降低电力系统的不对称谐波水平。

参 考 文 献

- (1) J.Arrillaga, O.A.Bradley, P.S.Bodger. Power system harmonics
- (2) J.Arrillaga. Computer modelling of electrical power system
- (3) 铁道部颁. 机车牵引计算规程
- (4) 上海铁道学院等. 电传动机车控制
- (5) 曾建猷. 电气化铁道供电系统
- (6) 河南电力科试所. 焦作地区谐波测试报告
- (7) SS-1型电力机车谐波模型研究. 郑州工学院学报
- (8) 西安交大等. 电力系统计算
- (9) 王铭成. 电力系统谐波阻抗计算. 华北电力学院学报
- (10) 赵书强. 电力系统不对称谐波潮流研究

The Study of Unsymmetrical Harmonics Tidal Currents in Electrical Power System

Wang Qinren Zhao Shuqiang Liu Baoren Zhou Yong
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: The three phase calculating method of unsymmetrical harmonics tidal currents has been studied in this paper. Primarily, it gives the source of harmonics currents of electric railway, then, the calculating equations of harmonics currents in the power system and uses three phase P-Q analysis method to build up the arithmetical model of unsymmetrical fundamental tidal current. It suggests the calculating method of unsymmetrical harmonics tidal currents through the solution of three phase linear nodes equation $[\dot{I}_n] = [\dot{Y}_n][\dot{U}_n]$. According to the arithmetical model, the authors program the corresponding calculating procedure and apply it to a local network in Henan and get a comparatively satisfied result.

Keywords: Electric power system, harmonics