

基于改进的稳态法获取三相系统谐波阻抗^{*}

艾永乐 都静静 王玉栋 王伟

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 在三相电力系统,当各相间存在耦合阻抗以及三相系统不对称运行时,应用稳态法和瞬态法不能获取准确的谐波阻抗,本文提出改进的稳态法来获取系统侧谐波阻抗。首先求取相模变换矩阵,将三组可测数据解耦成单变量数据,简化计算过程;其次,在 MATLAB/Simulink 中建立单相仿真模型,对稳态法和瞬态法进行对比;第三,建立存在耦合阻抗且不对称运行的三相仿真模型,应用稳态法与改进的稳态法计算系统侧谐波阻抗。实验表明稳态法比瞬态法获取阻抗值更加准确,且受干扰因素较少;选择稳态法获取系统侧谐波阻抗,经相模变换改进后,提高了准确率,并简化了计算过程。

关键词: 系统侧谐波阻抗;改进的稳态法;相模变换;稳态法;瞬态法

中图分类号: TM74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

The three-phase system harmonic impedance determination based on the improved steady-state methods

Ai Yongle Du Jingjing Wang Yudong Wang Wei

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Steady-state methods and transient methods can't give the accurate results when the coupling impedance and three-phase unbalance load exist in power system. In this paper, the improved steady-state method is proposed to obtain the system harmonic impedance. Firstly, the phase-mode transformation matrix is calculated which can de-couple the three measurements into a set of single variables and simplify the calculation process; Secondly, single-phase model is established by MATLAB/Simulink to compare steady-state methods with transient methods; Thirdly, three-phase model is established which exists the coupling impedance and three-phase unbalance load. The steady-state methods and the improved steady-state methods is applied to calculate the the system harmonic impedance. The results show that the steady-state methods is more accurate than the transient methods and have less interference; The steady-state methods is improved by the phase-mode transformation and the improved methods is selected to obtain the system harmonic impedance which improves the accuracy and simplifies the process of calculation.

Keywords: the network harmonic impedance; the improved steady-state methods; the phase-mode transformation; steady-state methods; transient methods

1 引言

在电力系统理想条件下,电压和电流应该是随时间变化的单一频率的正弦波。然而,由于电力系统中存在着从发电、输电和用电等大量非线性设备或负载,致使理想的条件被破坏而产生大量电力谐波。谐波会对电网产生危害,电能质量不佳会对工矿企业产生直接或间接的影响,因此谐波分析对研究电能质量至关重要^[1-2]。在谐波分析中,谐波阻抗是电力系统中一个重要特征参数,决定了电力系统

中存在谐波电流时的谐波电压大小或者电压的畸变程度。为了准确表示电力系统的频率响应特性和设计谐波抑制方案,必须准确测量谐波阻抗。因此,谐波阻抗的获取具有重要意义。

现如今,国内外领域已经有大量获取谐波阻抗的方法,这些方法基本上可以被分为“非干预式法(non-invasive)”和“干预式法(invasive)”两类^[3-6]。“非干预式法”是在电力系统以某种固定方式正常运行的情况下,利用自身可测参数来估算系统的谐波阻抗。例如

波动量法,系统内部的谐波源会引起电压和电流的波动,根据电压和电流的波动量比值估算谐波阻抗值^[7]。该方法简单、估算精度高,但是如果系统本身的谐波源不足以引起较大的波动量变化或者测量系统没有较好的同步性,那么该方法就不能给出正确的结果。“干预式法”的前提是不影响电网的正常运行,向系统强迫加入扰动,引起谐波电压和谐波电流的变化,根据变化量获取谐波阻抗。例如谐波电流注入法,利用谐波电流注入器向测试点强迫注入特定的谐波电流,测量产生的相应谐波电压,从而求出相应的谐波阻抗。该方法成本较高、测量过程烦琐且时间较长。开关元件法可以被分为稳态法和瞬态法^[8-9]两类,通过网络元件或某一支路的开关动作对系统加入扰动,对特定位置谐波电压和谐波电流的稳态或瞬态过程进行研究,从而获取系统的谐波阻抗。该方法操作简单、易于实现。

在三相系统存在耦合阻抗且不对称运行状态下,本文提出改进的稳态法计算系统侧谐波阻抗。在 MATLAB/Simulink 中建立单相仿真模型,对比稳态法和瞬态法的优缺点,选择稳态法计算三相系统的系统侧谐波阻抗。在电网实际运行中,电力系统各相间存在耦合阻抗且不对称运行,仅通过单相可测数据不能得到准确的阻抗值,本文利用相模变换矩阵改进稳态法,将三组测量数据都应用于计算,提高准确率。建立三相仿真模型,分别应用稳态法和改进的稳态法计算三相系统的系统侧谐波阻抗,验证了本文所提方法的准确性和可行性。

2 稳态法和瞬态法获取谐波阻抗的对比

在谐波阻抗的获取过程中,要明确在电力系统中的测量位置。如图 1 所示,一般在 PCC 处将电网分成两个部分:系统侧和用户侧。本文通过对 PCC 处的电压和电流数据进行采样,获取系统侧谐波阻抗。

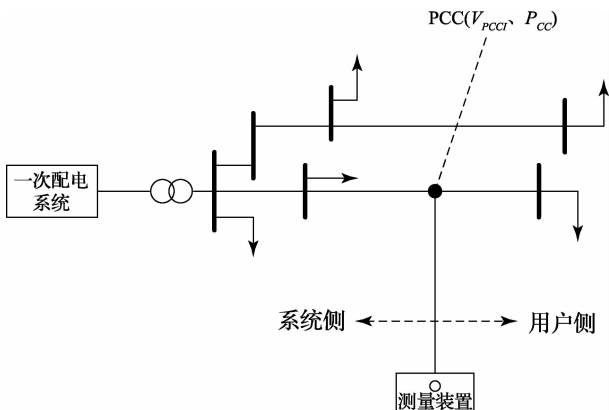


图 1 在 PCC 处测量谐波阻抗

态法是利用 PCC 处电压和电流的稳态波形获取谐波阻抗,而瞬态法利用的是电力系统的瞬态数据,经过处理来获得谐波阻抗。下面将分别阐述两者的原理。

2.1 稳态法

以单相系统简化模型来说明稳态法的基本原理,模型如图 2 所示。图 2 中, V_{PCC} 和 I_{PCC} 分别为 PCC 处的谐波电压和谐波电流。 C 为并联电容器,通过 S 控制电容器投切。

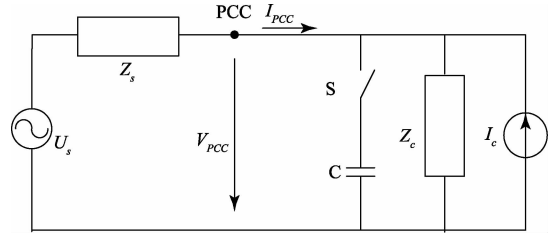


图 2 谐波源等值电路

开关 S 闭合前,由图 2 可知:

$$V_{PCC-pre} = U_s - I_{PCC-pre} Z_s \quad (1)$$

闭合开关 S 后,向系统中加入扰动, U_s 和 Z_s 保持不变,此时:

$$V_{PCC-post} = U_s - I_{PCC-post} Z_s \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:

$$Z_s = -\frac{V_{PCC-pre} - V_{PCC-post}}{I_{PCC-pre} - I_{PCC-post}} = -\frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3)$$

稳态法获取系统谐波阻抗的计算步骤如下:

1) 对扰动前后 PCC 处电压和电流的稳态波形进行采样,扰动前后的采样数据如图 3 所示;

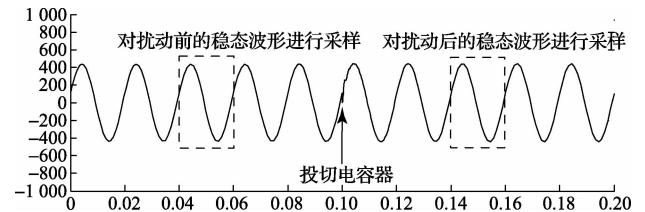


图 3 电压稳态波形采样

2) 对电压和电流的采样数据分别进行快速傅里叶变换 (FFT);

3) 利用式(3)获取各次系统侧谐波阻抗;

4) 对 PCC 处电压和电流进行多次采样,计算得出多组数据,再利用最小二乘法拟合数据,得到准确的谐波阻抗。

2.2 瞬态法

瞬态法利用的是投切前后 PCC 处电压和电流的瞬态过程,如图 4 所示,通过频率响应估计的原理,获取系统的谐波阻抗。

稳态法和瞬态法是获取谐波阻抗的两种不同方法,稳

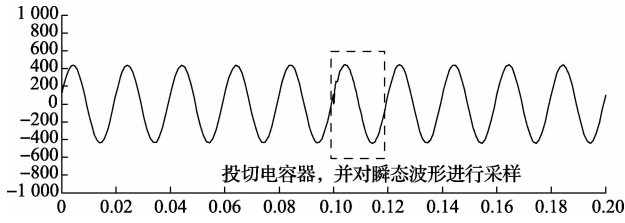


图4 电压瞬态波形采样

在系统正常运行情况下,假定输出信号 $U(t)$ 、输入信号 $I(t)$ 与外来信号 $N(t)$ 都是平稳随机过程, $N(t)$ 与 $I(t)$ 不相关, $U(t)$ 被 $N(t)$ 污染,如图5所示。由维纳-辛钦定理可知,平稳随机过程的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换。通过使用电压和电流的功率谱来计算高频阻抗:

$$Z(f) = \frac{P_{VI}(f)}{P_{II}(f)} \quad (4)$$

式中: $P_{VI}(f)$ 是电压和电流的互相关函数的傅里叶变换,即互功率谱函数; $P_{II}(f)$ 是电流自相关函数的傅里叶变换,即自功率谱函数。

$$K_{VI}(f) = \frac{|P_{VI}(f)|^2}{P_{VV}(f)P_{II}(f)} \quad (5)$$

式中: $K_{VI}(f)$ 为互谱与自谱的相干函数,取值范围为 $0 \sim 1$ 。通过相干函数来提高阻抗计算的有效性。

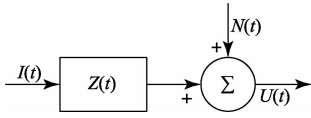


图5 瞬态法原理

瞬态法获取系统谐波阻抗的计算步骤如下:

- 1) 对 PCC 处电压和电流的瞬态波形分别进行采样;
- 2) 分别求取电压和电流的互相关函数、电压和电流的自相关函数,并对互相关函数和自相关函数进行傅里叶变换求取 $P_{VI}(f)$ 、 $P_{VV}(f)$ 和 $P_{II}(f)$,利用式(5)排除不合理数据;
- 3) 利用式(4)求取谐波阻抗;
- 4) 经过多次采样计算获得多组结果,再利用最小二乘法拟合数据,得到准确的系统侧谐波阻抗。

3 三相电力系统谐波阻抗的获取

在大多数的谐波阻抗测量方法中,通常假设电力系统是三相对称的,仅通过测量单相电压和电流的数据来获取系统谐波阻抗。然而,在实际运行的电网中,负荷不对称或电路故障等都会使得电力系统处于不对称运行状态;此外,各相间也存在着复杂的电磁耦合关系,各相存在在耦合阻抗,仅由单相可测数据得不到确切的系统谐波阻抗^[10-11]。因此,要获取三相电力系统准确的系统谐波阻抗,必须测量 PCC 处所有相的电压和电流数据,将三组数据都用于

计算。

假设三相输电线路间参数平衡,各相间的自阻抗和耦合阻抗相等,则:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}。$$

由式(6)可以看出,直接求解方程非常复杂,因此考虑采用相模变换将矩阵 \mathbf{Z} 变为对角矩阵,将三组测量数据解耦成单变量数据,简化计算过程。

矩阵 \mathbf{Z} 的特征方程式为:

$$|\mathbf{Z} - \lambda \mathbf{E}| = \begin{vmatrix} Z_s - \lambda & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s - \lambda & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s - \lambda \end{vmatrix} = (Z_s + 2Z_m - \lambda)(Z_s - Z_m - \lambda)^2 \quad (7)$$

由 $|\mathbf{Z} - \lambda \mathbf{E}| = 0$ 得 \mathbf{Z} 的特征值为 $\lambda_1 = Z_s + 2Z_m$, $\lambda_2 = \lambda_3 = Z_s - Z_m$ 。另外,由矩阵对角化知识可知 $\mathbf{C}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{C} = \Lambda$,其中 $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\}$ 。

当 $\lambda_1 = Z_s + 2Z_m$ 时,由 $(\mathbf{Z} - \lambda \mathbf{E})\mathbf{c} = 0$,解得 $c_1 = c_2 = c_3$,基础解系可取 $\partial_1 = (1, 1, 1)^T$ 。同理,当 $\lambda_2 = \lambda_3 = Z_s - Z_m$ 时,得基础解系 $\partial_2 = (1, 2, -3)^T$ 和 $\partial_3 = (1, -2, 1)^T$ 。则可得:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -2 \\ 1 & -3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} -1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/4 & 0 & -1/4 \\ 5/12 & -1/3 & -1/12 \end{bmatrix}$$

电压和电流数据进行相模变换和逆变换的关系式为:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}^T = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}^T = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(6),得:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{C} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式子(10)可知:

$$Z_0 = Z_s + 2Z_m, Z_\alpha = Z_\beta = Z_s - Z_m。$$

则可得:

$$Z_s = \frac{Z_0 + 2Z_\alpha}{3} \quad (11)$$

三相电力系统谐波阻抗的获取步骤如下：

- 1) 选定合适的方法进行三相系统谐波阻抗的获取；
- 2) 对电压和电流数据进行采样，利用式(8)和(9)对采样数据进行相模变换；
- 3) 利用选定方法计算 0 和 α 分量谐波阻抗 Z_0 和 Z_α ；
- 4) 由式(11)求出系统侧谐波阻抗。

4 实验仿真

本文采用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立仿真模型，在相同的条件下分别利用稳态法和瞬态法获取系统谐波阻抗，仿真模型如图 6 所示。通过对比两者的优缺点，选择合适的方法对三相系统进行仿真分析。

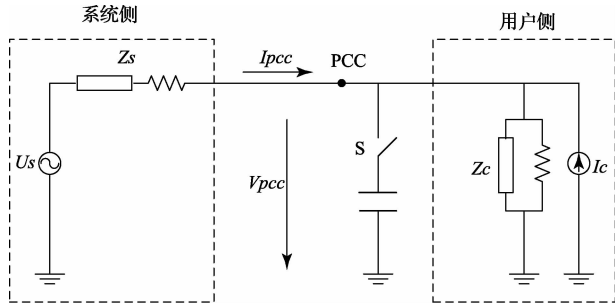


图 6 单相系统仿真模型

在图 6 中，系统侧电压源 U_s 和用户侧电流源 I_c 都包含有基波、3 次、5 次、7 次和 9 次谐波，设定系统谐波阻抗 Z_s 为 $(10 + j1.664)\Omega$ 。

首先利用稳态法获取单相仿真系统的系统侧谐波阻抗，设置仿真时间为 5 s，在 $t=1$ s 时闭合开关 S，对公共连接点 PCC 处扰动前后电压和电流的稳态波形分别进行采样，并对其进行快速傅里叶分析，根据式(3)获取各次系统侧谐波阻抗。实验结果如表 1 所示。

表 1 稳态法获取谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.664	9.984	1.651	0.16%	0.78%
3	10	4.992	9.997	4.982	0.03%	0.20%
5	10	8.320	9.987	8.316	0.13%	0.05%
7	10	11.648	9.993	11.644	0.07%	0.03%
9	10	14.976	10.006	14.963	0.06%	0.09%

通过多次仿真实验，对 50 组数据采用最小二乘法估算出一个较为准确的谐波阻抗值，拟合方程如下：

$$R(h) = (-0.0081h + 10.0353) \approx 10.0353 \Omega$$

$$X(h) = (1.6522h + 0.0065) \approx 1.6522h \Omega$$

由此可以得出稳态法计算的系统侧基波阻抗 Z_s 为 $(10.0353 + j1.6522)\Omega$ ，与设定值相比误差较小，说明稳态

法能够较为准确的测量出系统侧谐波阻抗。

利用瞬态法获取系统侧谐波阻抗，与稳态法在相同参数条件下进行实验仿真。在 $t=1$ s 时闭合开关 S，对 PCC 处电压和电流的瞬态波形分别进行采样，求取电压和电流的互相关函数、电压和电流的自相关函数，对其进行傅里叶分析求取互功率谱函数和自功率谱函数，根据式(5)排除不合理数据，并由式(4)求取系统的谐波阻抗。实验结果如表 2 所示。

表 2 瞬态法获取谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.664	9.933	1.882	0.07%	13.1%
3	10	4.992	9.984	5.438	0.02%	8.93%
5	10	8.320	10.097	8.230	0.97%	1.08%
7	10	11.648	10.847	12.438	8.47%	6.78%
9	10	14.976	10.867	16.220	8.67%	8.31%

通过多次仿真实验，对 50 组数据采用最小二乘法估算出一个较为准确的谐波阻抗值，拟合方程如下：

$$R(h) = (-0.0066h + 9.8828) \approx 9.8828 \Omega$$

$$X(h) = (1.7838h + 0.0074) \approx 1.7838h \Omega$$

由此可以得出瞬态法计算的系统侧基波阻抗 Z_s 为 $(9.8828 + j1.7838)\Omega$ ，与设定值相比有一定的误差。

通过表 1 和表 2 可知，稳态法和瞬态法都能求出系统谐波阻抗，稳态法获取谐波阻抗结果精度较高。在仿真过程中可以发现，利用瞬态法获取系统谐波阻抗时，扰动信号持续时间较短，且信号容易受到开关时刻的影响；当瞬时电压变化量较小时，获取谐波阻抗的精度下降。通过对比稳态法和瞬态法，本文选择稳态法用于三相电力系统谐波阻抗的获取。

本文选用稳态法在三相电力系统各相间存在电磁耦合关系的情况下测量系统谐波阻抗，且用户侧三相负荷不对称，图 7 为三相系统的仿真模型。设定系统侧各相的系统基波阻抗为 $(10 + j1.57)\Omega$ ，各相间存在的耦合阻抗为 $(2 + j0.314)\Omega$ 。系统侧的电压源和用户侧的谐波电流源都包含了基波、3 次、5 次和 7 次谐波。通过开关 S 控制并联电容器组的投切。

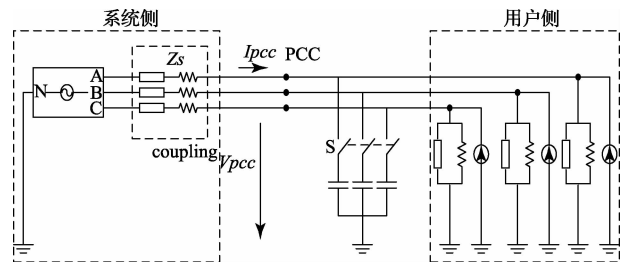


图 7 三相系统仿真模型

在三相电力系统各相间存在耦合阻抗且三相不对称的情况下,直接采用稳态法分别求取 A、B、C 三相的系统侧谐波阻抗。仿真时间为 4 s,在 $t=1$ s 时闭合开关 S,分别对公共连接点 PCC 处扰动前后 A、B、C 各相的电压和电流的稳态波形进行采样,根据式(3)求取各相的系统侧谐波阻抗。A、B、C 三相的各次系统侧谐波阻抗值获取结果分别如表 3、表 4 和表 5 所示。

表 3 A 相系统谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.57	6.579	1.427	34.21%	14.3%
3	10	4.71	14.099	2.499	40.99%	46.94%
5	10	7.85	7.451	6.148	25.49%	21.68%
7	10	10.99	3.299	0.090	67.01%	99.18%

表 4 B 相系统谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.57	8.517	1.384	14.83%	11.84%
3	10	4.71	9.652	5.487	3.48%	16.50%
5	10	7.85	9.294	6.681	7.06%	14.89%
7	10	10.99	13.203	7.105	32.03%	35.35%

表 5 C 相系统谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.57	8.414	0.660	15.86%	57.96%
3	10	4.71	7.727	5.103	22.73%	46.94%
5	10	7.85	8.472	4.694	15.28%	21.68%
7	10	10.99	1.883	3.200	81.17%	70.88%

由表 3、表 4 和表 5 可以看出:在三相电力系统各相存在耦合阻抗且三相不对称的情况下,如果直接用稳态法分别获取 A、B、C 三相各相的系统侧谐波阻抗,各相系统侧谐波阻抗获取结果的误差较大。因此,仅通过某一相的可测数据来获取三相系统谐波阻抗是不准确的,必须将三组测量数据都用于系统侧谐波阻抗的获取。

在相同条件下,采用改进的稳态法测量三相系统的谐波阻抗。首先,对三相系统 PCC 处各相的电压和电流的稳态波形分别进行采样;其次,求取相模变换矩阵,利用式(8)和式(9)对电压和电流数据进行相模变换,将三组数据解耦成为单变量数据,计算出 0 和 α 分量的谐波阻抗 Z_0 和 Z_α ,并由式(11)求取系统侧谐波阻抗。实验仿真结果如表 6 所示。

表 6 三相系统谐波阻抗

谐波次数 h	参考值/ Ω		计算值/ Ω		误差(%)	
	R	X	R	X	R	X
1	10	1.57	10.169	1.525	1.69%	2.87%
3	10	4.71	9.541	4.131	4.59%	12.3%
5	10	7.85	10.916	7.127	9.16%	9.21%
7	10	10.99	9.880	10.778	1.20%	1.93%

由表 6 可以看出:在电力系统各相间存在耦合阻抗且不对称运行状态下,利用相模变换矩阵改进稳态法后,将三组数据全部用于谐波阻抗的计算,与直接应用稳态法求取某一相的谐波阻抗相比,准确率提高;相模变换矩阵将三组数据解耦成为单变量数据,简化了计算过程。

5 结 论

在三相系统各相间存在耦合阻抗和不对称运行状态下,本文选择改进的稳态法获取三相系统的系统侧谐波阻抗。通过仿真实验可知,改进的稳态法比瞬态法获取系统侧谐波阻抗更加准确,且受干扰因素较少;在各相间存在耦合阻抗的情况下,仅通过稳态法测量某一相得不到准确的阻抗值,利用相模变换改进稳态法,将 PCC 处三组测量数据全部用于计算,提高了准确率,并且简化了计算过程。

参考文献

- [1] 薛凌云,黄伟,陈超.基于空间谱估计技术的间谐波小波检测算法[J].电子测量技术,2014,37(10):46-49.
- [2] 魏学良,程婷.谐波治理设备在供电系统中的应用[J].国外电子测量技术,2015,34(1):80-83.
- [3] 欧阳碧欢,赵春宇.现有电网谐波检测方法及其发展趋势[J].电子测量技术,2009,32(7):1-4.
- [4] 张达,金立军.基于频谱细化与插值法的特征谐波分析研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(4):298-304.
- [5] 刘佑达,王雪,刘晏池.面向智能用电网络自适应脉冲耦合同步的谐波测量[J].仪器仪表学报,2014,35(7):1459-1465.
- [6] 蔡景青.谐波阻抗估计的方法及应用研究[J].电子技术与软件工程,2013,(22):114-114.
- [7] 王诗超,沈沉,程建洲.考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法[J].电力系统自动化,2012,36(3):65-70.
- [8] 吕洋,徐政.投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J].高电压技术,2009,35(7):1780-1784.
- [9] 郝福忠,赵锋,李晋城,等.考虑电网谐波影响的电容器投切研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(4):79-83.

(下转第 25 页)