



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111308207 A

(43)申请公布日 2020.06.19

(21)申请号 202010150259.X

(22)申请日 2020.03.06

(71)申请人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市二环路北一段
111号西南交通大学科技处

(72)发明人 刘志刚 吴思奇

(74)专利代理机构 成都信博专利代理有限责任
公司 51200

代理人 舒启龙

(51)Int.Cl.

G01R 27/02(2006.01)

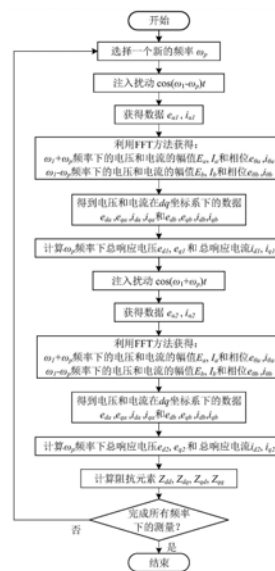
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法,具体为:1、注入扰动,测量系统响应电流和电压;2、通过快速傅里叶变换FFT的方法,得到 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 、 $\omega_1 - \omega_p$ 的电流和电压的相位和峰值;3、分别将 α β 坐标系下对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;4、分别将 α β 坐标系下对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;5、计算得到dq坐标系下的总的响应电流和总的响应电压;6、计算得到dq坐标系下的系统阻抗矩阵 Z_{dq} 。本发明的测量方法简单有效,结果比较准确。



1. 一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:注入扰动,测量系统响应电流和电压:

选择一个扰动频率 ω_p ,注入两个线性无关的扰动电压 e_{pa1} 和 e_{pa2} ,并将其视为 α 轴分量:

$$e_{pa1}=E_{pm}\cos(\omega_1-\omega_p)t, e_{pa2}=E_{pm}\cos(\omega_1+\omega_p)t$$

其中, ω_1 为基波角频率, E_{pm} 为扰动电压 e_{pa1} 和 e_{pa2} 的峰值;然后,通过测量得到电路的响应电流 i_{a1} 、 i_{a2} 以及响应电压 e_{a1} 、 e_{a2} ;

步骤2:通过快速傅里叶变换FFT的方法,得到 α 轴中对应频率 $\omega_1+\omega_p$ 、 $\omega_1-\omega_p$ 的电流和电压的相位和峰值;

步骤3:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1+\omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;

步骤4:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1-\omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;

步骤5:计算得到dq坐标系下的总的响应电流和总的响应电压;

$$X_d=X_{da}+X_{db}, X_q=X_{qa}+X_{qb}$$

其中, X_d 和 X_q 分别表示d轴总响应电流或电压和q轴总响应电流或电压, X_{da} 和 X_{qa} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1+\omega_p$ 的电流或电压所对应的d轴分量和q轴分量, X_{db} 和 X_{qb} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1-\omega_p$ 的电流或电压所对应的d轴分量和q轴分量;

步骤6:计算得到dq坐标系下的系统阻抗矩阵 Z_{dq} :

$$\mathbf{Z}_{dq} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{d1} & e_{d2} \\ e_{q1} & e_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} & i_{d2} \\ i_{q1} & i_{q2} \end{bmatrix}^{-1}$$

其中, e_{d1} 、 e_{q1} 、 i_{d1} 、 i_{q1} 分别表示注入了第一个扰动电压后d轴响应电压、q轴响应电压、d轴响应电流、q轴响应电流; e_{d2} 、 e_{q2} 、 i_{d2} 、 i_{q2} 分别表示注入了第二个扰动电压后d轴响应电压、q轴响应电压、d轴响应电流、q轴响应电流。

2. 根据权利要求1所述的一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法,其特征在于,所述步骤3中响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$x_{da}=-X_a\sin(\omega_p t+x_{0a}), x_{qa}=X_a\cos(\omega_p t+x_{0a})$$

其中, X_a 和 x_{0a} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1+\omega_p$ 的响应电流或电压的峰值和相位。

3. 根据权利要求1所述的一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法,其特征在于,所述步骤4中,当 $\omega_1>\omega_p$ 时,响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$x_{db}=X_b\sin(\omega_p t-x_{0b}), x_{qb}=X_b\cos(\omega_p t-x_{0b})$$

当 $\omega_1<\omega_p$ 时,响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$x_{db}=X_b\sin(\omega_p t+x_{0b}), x_{qb}=X_b\cos(\omega_p t+x_{0b})$$

其中, X_b 和 x_{0b} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1-\omega_p$ 的响应电流或电压的峰值和相位。

一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于单相系统的阻抗测量技术领域,具体为一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法。

背景技术

[0002] 随着新能源发电、高速铁路、高压直流输电以及控制技术的迅猛发展,电力电子变换器因其灵活可控以及高效率等特性在电力系统中的渗透率越来越高,使得电力系统电力电子化日益显著,电力系统的稳定性面临巨大的挑战。基于阻抗的稳定性分析方法广泛用于分析复杂电力电子化电力系统的稳定性,该方法基于整个系统中并联或者级联的子系统的输入或者输出阻抗来进行稳定性评估。在系统参数未知的情况下,可将每个子系统视为一个黑匣子,仅通过阻抗测量即可预测系统的动态特性,因此,对各个子系统进行阻抗的精确测量具有非常重要的意义。

[0003] dq解耦控制可以实现系统有功功率和无功功率的单独控制,常被用于交流系统中电力电子变换器的控制。因此,建立该系统的dq系阻抗有利于进行稳定性分析,便于通过控制参数的调整来实现系统阻抗的重塑。目前,在单相系统中,S.Lissandron等提出了RI系下的阻抗测量方法,针对dq阻抗的测量方法仍处在研究阶段,Y.Liao等提出了基于Hilbert变换的dq阻抗测量方法,但当扰动频率大于基波频率时,需要附加扰动的注入,整个测量过程繁琐。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于设计一种简单易行且适用于所有单相交流系统的dq阻抗测量方法,避免了当扰动频率大于基波频率时,附加扰动的注入,可以精确地实现系统dq阻抗的测量。为此本发明提供一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法。

[0005] 一种针对单相交流系统的dq阻抗测量方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤1:注入扰动,测量系统响应电流和电压:

[0007] 选择一个扰动频率 ω_p ,注入两个线性无关的扰动电压 e_{pa1} 和 e_{pa2} ,并将其视为 α 轴分量。

[0008] $e_{pa1} = E_{pm} \cos(\omega_1 - \omega_p) t$, $e_{pa2} = E_{pm} \cos(\omega_1 + \omega_p) t$

[0009] 其中 ω_1 为基波角频率, E_{pm} 为扰动电压 e_{pa1} 和 e_{pa2} 的峰值;然后,通过测量,可以得到电路的响应电流 i_{a1} 、 i_{a2} 以及响应电压 e_{a1} 、 e_{a2} 。

[0010] 步骤2:通过快速傅里叶变换(FFT)的方法,得到 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 、 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流和电压的相位和峰值;

[0011] 步骤3:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;

[0012] 步骤4:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下;

[0013] 步骤5:计算得到dq坐标系下的总的响应电流和总的响应电压;

[0014] $X_d = X_{da} + X_{db}$, $X_q = X_{qa} + X_{qb}$

[0015] 其中, x_d 和 x_q 分别表示d轴总响应电流(或电压)和q轴总响应电流(或电压), x_{da} 和 x_{qa} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1 + \omega_p$ 的电流(或电压)所对应的d轴分量和q轴分量, x_{db} 和 x_{qb} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1 - \omega_p$ 的电流(或电压)所对应的d轴分量和q轴分量。

[0016] 步骤6: 计算得到dq坐标系下的系统阻抗矩阵 Z_{dq} :

$$[0017] \quad Z_{dq} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{d1} & e_{d2} \\ e_{q1} & e_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} & i_{d2} \\ i_{q1} & i_{q2} \end{bmatrix}^{-1}$$

[0018] 其中, e_{d1} 、 e_{q1} 、 i_{d1} 、 i_{q1} 分别表示注入了第一个扰动电压后d轴总响应电压、q轴总响应电压、d轴总响应电流、q轴总响应电流; e_{d2} 、 e_{q2} 、 i_{d2} 、 i_{q2} 分别表示注入了第二个扰动电压后d轴总响应电压、q轴总响应电压、d轴总响应电流、q轴总响应电流;

[0019] 进一步的, 所述步骤3中响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$[0020] \quad x_{da} = -X_a \sin(\omega_p t + x_{0a}), x_{qa} = X_a \cos(\omega_p t + x_{0a})$$

[0021] 其中, X_a 和 x_{0a} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流(或电压)的峰值和相位。

[0022] 进一步的, 所述步骤4中, 当 $\omega_1 > \omega_p$ 时, 响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$[0023] \quad x_{db} = X_b \sin(\omega_p t - x_{0b}), x_{qb} = X_b \cos(\omega_p t - x_{0b})$$

[0024] 其中, X_b 和 x_{0b} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流(或电压)的峰值和相位; 当 $\omega_1 < \omega_p$ 时, 响应电压和响应电流在dq坐标系下的表达式为:

$$[0025] \quad x_{db} = X_b \sin(\omega_p t + x_{0b}), x_{qb} = X_b \cos(\omega_p t + x_{0b})$$

[0026] 本发明的有益效果是:

[0027] 本发明的测量方法简单, 在整个频率段, 一次测量只需注入两个扰动, 避免了当扰动频率大于基波频率时, 附加扰动的注入。该测量方法, 考虑了电流电压中 $\omega_1 + \omega_p$ 和 $\omega_1 - \omega_p$ 频率下的成分, 可以精确测量系统的阻抗。

附图说明

[0028] 图1为本发明的电压扰动注入情况下的示意图。

[0029] 图2为本发明的电流扰动注入情况下的示意图。

[0030] 图3为本发明的RL串联仿真电路示意图。

[0031] 图4为本发明的dq阻抗算法流程图。

[0032] 图5为根据本发明测量得到的RL串联电路的阻抗波特图(Z_{dd} 、 Z_{dq} 、 Z_{qd} 、 Z_{qq} 的幅频图和相频图)。

具体实施方式

[0033] 下面结合附图和实例对本发明做进一步详细说明。

[0034] 本实施例以本发明技术方案为前提实施进行, 展示了详细的实施过程, 以注入电压扰动为例进行说明。包括注入扰动, 测量系统响应电流和电压; 通过FFT方法, 得到 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 、 $\omega_1 - \omega_p$ 的电流和电压的相位和峰值; 分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流和电压转换到在dq坐标系下; 分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流和电压转换到在dq坐标系下; 计算得到dq坐标系下的总的响应电流和总的响应电压; 计算得

到dq坐标系下的系统阻抗矩阵 Z_{dq} 。

[0035] 步骤1:注入扰动,测量系统响应电流和电压。

[0036] 为了测量子系统的输入阻抗,首先需要向子系统注入小信号扰动,如图1和2所示。有电流扰动和电压扰动两种类型,它们与源的类型相关。dq阻抗的计算需要得到两组dq系下线性无关的电压和电流分量,因此,所设计的两组电流电压扰动dq分量也需要满足线性无关的条件。为了获取期望的电路响应,设计dq系下的扰动为:

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} e_{p1} & e_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{pd1} & e_{pd2} \\ e_{pq1} & e_{pq2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{pm} \sin(\omega_p t) & -E_{pm} \sin(\omega_p t) \\ E_{pm} \cos(\omega_p t) & E_{pm} \cos(\omega_p t) \end{bmatrix}$$

[0038] 其中, e_{p1} 和 e_{p2} 是线性无关的, E_{pm} 为扰动电压的峰值, ω_p 为扰动角频率。

[0039] 通过Park变换,得到注入到单相系统实际电路的电压扰动:

$$[0040] \quad [e_{p\alpha1} \ e_{p\alpha2}] = [E_{pm} \cos(\omega_1 - \omega_p) t \ E_{pm} \cos(\omega_1 + \omega_p) t]$$

[0041] 其中, ω_1 为基波角频率。

[0042] 通过将上述两个独立的电压扰动 $e_{p\alpha1}$ 和 $e_{p\alpha2}$ 注入实际电路,可以测得相应的响应电流 $i_{\alpha1}$ 、 $i_{\alpha2}$ 以及响应电压 $e_{\alpha1}$ 、 $e_{\alpha2}$ 。

[0043] 步骤2:通过快速傅里叶变换(FFT)的方法,得到 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 、 $\omega_1 - \omega_p$ 的电流和电压的相位和峰值。

[0044] 通过对步骤1中测量的响应电流 $i_{\alpha1}$ 、 $i_{\alpha2}$ 以及响应电压 $e_{\alpha1}$ 、 $e_{\alpha2}$ 作FFT变换,可以得到 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 、 $\omega_1 - \omega_p$ 下的响应电流和电压的相位和峰值,为步骤3和4中的dq系下响应电流和电压表达式的计算提供基础。

[0045] 步骤3:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下。

[0046] 根据步骤2中得到的对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 下的响应电流和电压的相位和峰值,可以直接得到dq系下的响应电流和电压的表达式,即:

$$[0047] \quad x_{da} = -X_a \sin(\omega_p t + x_{0a}), x_{qa} = X_a \cos(\omega_p t + x_{0a})$$

[0048] 其中, x_{da} 和 x_{qa} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1 + \omega_p$ 的电流(或电压)所对应的d轴分量和q轴分量, X_a 和 x_{0a} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1 + \omega_p$ 的响应电流(或电压)的峰值和相位。

[0049] 步骤4:分别将 $\alpha\beta$ 坐标系下对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流和电压转换到dq坐标系下。

[0050] 根据步骤2中得到的对应扰动频率 $\omega_1 - \omega_p$ 下的响应电流和电压的相位和峰值,可以直接得到dq系下的响应电流和电压的表达式。当 $\omega_1 > \omega_p$ 时,响应电压和电流在dq坐标系下的表达式为:

$$[0051] \quad x_{db} = X_b \sin(\omega_p t - x_{0b}), x_{qb} = X_b \cos(\omega_p t - x_{0b})$$

[0052] 其中, x_{db} 和 x_{qb} 分别表示 $\alpha\beta$ 系下频率为 $\omega_1 - \omega_p$ 的电流(或电压)所对应的d轴分量和q轴分量, X_b 和 x_{0b} 分别表示 α 轴中对应频率 $\omega_1 - \omega_p$ 的响应电流(或电压)的峰值和相位;当 $\omega_1 < \omega_p$ 时,响应电压和电流在dq坐标系下的表达式为:

$$[0053] \quad x_{db} = X_b \sin(\omega_p t + x_{0b}), x_{qb} = X_b \cos(\omega_p t + x_{0b})$$

[0054] 步骤5:计算得到dq坐标系下的总的响应电流和总的响应电压。

[0055] 将步骤3和步骤4中的d轴响应电流(或电压)相加,得到实际电路d轴总的响应电流(或电压),将步骤3和步骤4中的q轴响应电流(或电压)相加,得到实际电路q轴总的响应电流(或电压),即:

[0056] $X_d = X_{da} + X_{db}$, $X_q = X_{qa} + X_{qb}$

[0057] 其中, x_d 和 x_q 分别表示d轴总响应电流(或电压)和q轴总响应电流(或电压)。

[0058] 通过步骤5可以得到扰动频率为 ω_p 时,电路的响应电流和电压,为步骤6的dq阻抗计算提供基础。

[0059] 步骤6:计算得到dq坐标系下的系统阻抗矩阵 Z_{dq} 。

$$[0060] \quad Z_{dq} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{d1} & e_{d2} \\ e_{q1} & e_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} & i_{d2} \\ i_{q1} & i_{q2} \end{bmatrix}^{-1}$$

[0061] 其中, e_{d1} 、 e_{q1} 、 i_{d1} 、 i_{q1} 分别表示注入了第一个扰动电压后d轴总响应电压、q轴总响应电压、d轴总响应电流、q轴总响应电流; e_{d2} 、 e_{q2} 、 i_{d2} 、 i_{q2} 分别表示注入了第二个扰动电压后d轴总响应电压、q轴总响应电压、d轴总响应电流、q轴总响应电流;

[0062] 在MATLAB/Simulink中搭建一个简单的RL串联电路模型,如图3所示,用以验证该阻抗测量方法的准确性和有效性。由于该电路采用了电压源,因而选取图1中扰动注入的方式。

[0063] 通过公式推导,RL串联电路的dq系阻抗表示为:

$$[0064] \quad Z_{dq} = \begin{bmatrix} R + sL & -\omega_1 L \\ \omega_1 L & R + sL \end{bmatrix}$$

[0065] 其中,R和L分别表示图3中的电阻值和电感值。

[0066] 表1列出了图3电路中的参数值。

[0067] 表1电路参数

	名称	数值
[0068]	R	10Ω
	L	7mH
	ω_1	100π rad/s

[0069] 根据上文所述,设计了单相RL串联电路阻抗测量的详细流程图,如图4所示,整个阻抗测量和计算过程简便易行。

[0070] 使用扫频法,在频率区间[1Hz,500Hz]选取23个频率点,然后依据图4所示的流程图,在MATLAB中完成dq阻抗测量的算法。通过Simulink仿真和理论计算,得到图5所示的RL串联电路dq阻抗波特图。其中,实线表示理论计算的结果,圆圈表示阻抗测量的结果。可以看出,测量的阻抗与计算的阻抗匹配一致,说明该阻抗测量方法的准确性和有效性。

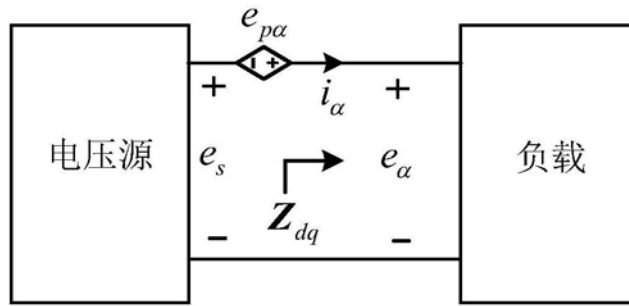


图1

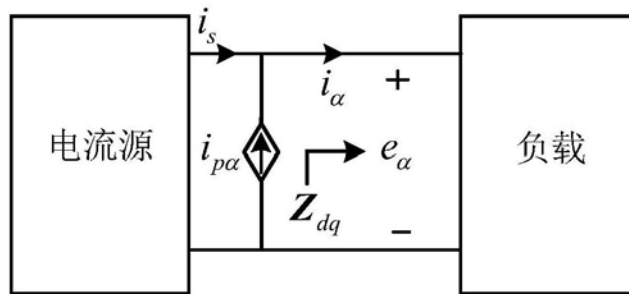


图2

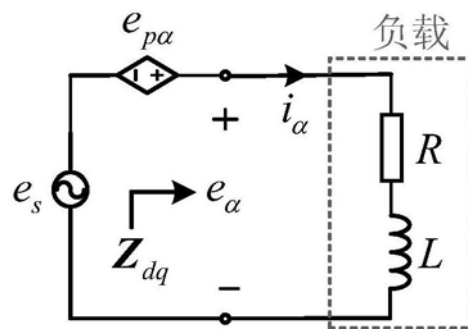


图3

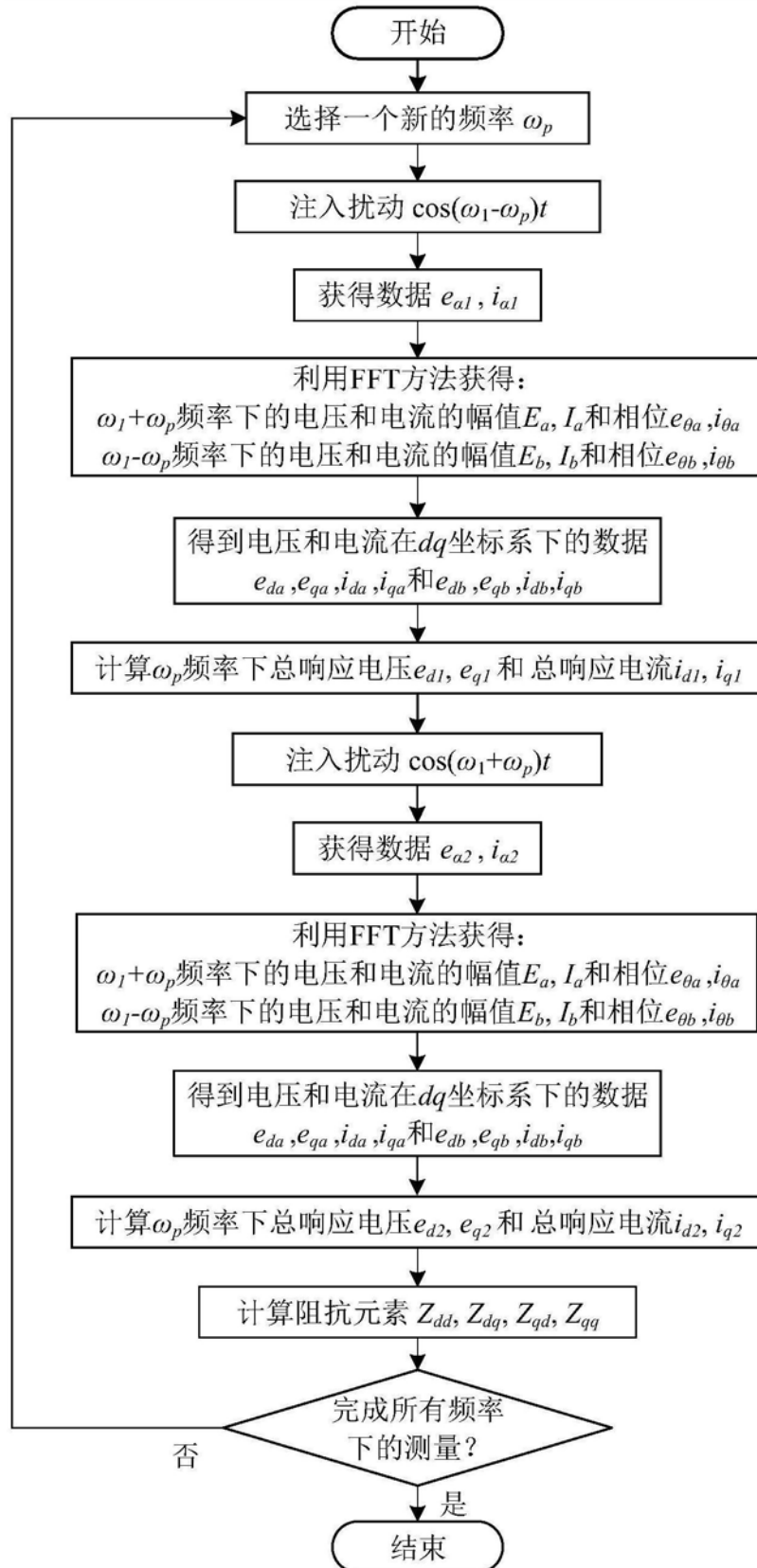


图4

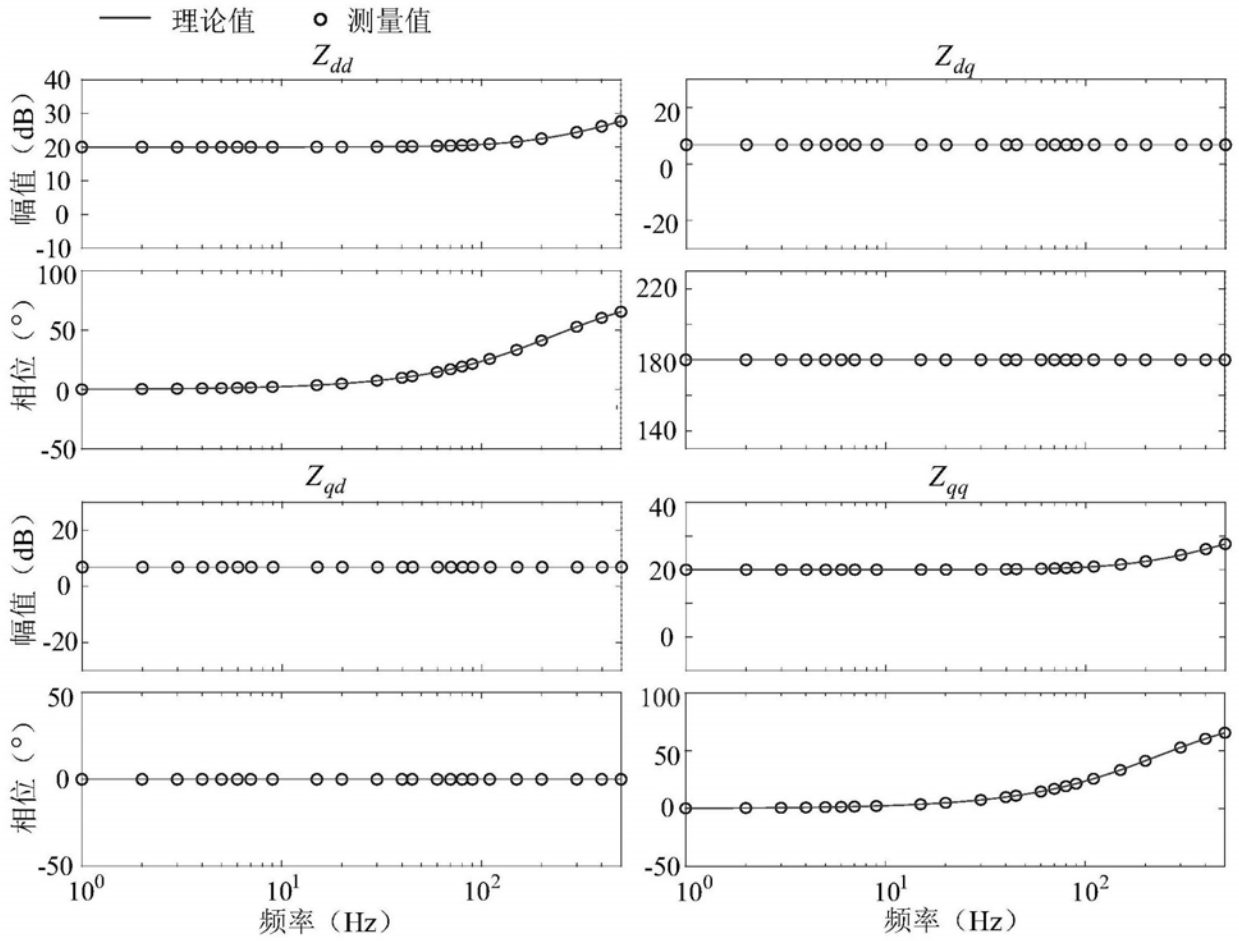


图5