

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200158

用于移动变电站的三相隔离变压器的降阶模型研究

高美金¹, 狄谦², 王婷婷¹, 贾芳丽², 黄江倩¹, 尤晓亮²,
杨嘉睿¹, 杨世彦³, 孟凡刚³

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000; 2. 河南平高电气股份有限公司,
河南 平顶山 467001; 3. 哈尔滨工业大学电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 三相隔离变压器是移动变电站的关键一次设备, 为在实验室环境下快速模拟该变压器的输入/输出特性, 应用 Arnoldi 算法建立了其降阶模型。根据电磁感应定律和安培定律, 搭建了三相隔离变压器的高精度电磁等效电路, 得到了输入电压、电流与磁通量变化率之间的定量关系。应用分块近似方法将变压器磁芯等效为多组环形回路, 得到了铁芯的磁路等效模型, 并根据该模型建立了磁阻、磁感与磁通量以及磁通量变化率之间的函数关系, 进而得到了变压器的状态方程。应用 Arnoldi 算法将状态方程进行降阶处理, 建立了三相隔离变压器的降阶模型, 并进行了相应的仿真与实验验证。实验结果验证变压器降阶模型的正确性和精确性。

关键词: 移动变电站; 三相隔离变压器; 电磁等效电路; 磁等效模型; 降阶模型

Research on reduced order model of three-phase isolated transformer used in a mobile substation

GAO Meijin¹, DI Qian², WANG Tingting¹, JIA Fangli², HUANG Jiangqian¹, YOU Xiaoliang²,
YANG Jiarui¹, YANG Shiyan³, MENG Fangang³

(1. Economic and Technological Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China;
3. School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The three-phase isolated transformer is the key primary equipment of the mobile substation. A reduced order model of the transformer is established based on the Arnoldi algorithm to fast simulate the input and output characteristics of the transformer in the laboratory environment. The high-precision electromagnetic equivalent circuit of the three-phase isolated transformer is built according to the electromagnetic induction and Ampere laws, and the quantitative relationship between the input voltage, current and the change rate of magnetic flux is obtained. The transformer core is made equivalent to a multi-set of ring loops using the block approximation method, and the equivalent magnetic circuit model of the core is obtained. Based on this model, the functional relations among the magnetic resistance, magnetic inductance, magnetic flux and the change rate of magnetic flux can be obtained, and then the state equation of the transformer can be obtained. The Arnoldi algorithm is applied to reduce the order of the state equation, and the reduced order model of the three-phase isolated transformer is obtained. Corresponding simulation and experiment are carried out to verify the correctness and accuracy of the reduced order model of the transformer.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677036 and No. 51777042) and China Postdoctoral Fund (No. 2017T100241).

Key words: mobile substation; three-phase isolated transformer; electromagnetic equivalent circuit; magnetic equivalent model; reduced order model

0 引言

移动变电站是集高压开关、变压器、低压开关

为一体的可移动的配电装置, 具有灵活机动、施工方便、供电周期短、可靠性高等优点, 在抢险救灾、项目施工、缓解局部区域的时段性供电紧张、局部区域的阶段性临时供电、变电站维修等场合发挥了强大作用^[1-4]。变压器是移动变电站的关键性一次设备, 其可实现升降压及工频隔离等功能, 直接决定

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51677036, 51777042);
中国博士后基金特别资助项目(2017T100241)

着移动变电站的性能^[5-9]。

移动变电站常用的变压器多为有载调压装置, 存在多个分接头, 这种特殊设计导致变压器结构复杂, 且各绕组间电感参数相互耦合, 难以在仿真软件中建立模型对其性能进行模拟^[10]。针对变压器的绕组建模及参数的辨识, 国内外学者进行了大量的研究^[11-29]。文献[11]使用 Ansys Maxwell 建立了实际变压器模型, 并与采用频率响应法得到的频率曲线进行了对比; 文献[12]把铁芯柱、铁轭、漏磁路径都等效成匝数为一次绕组的线圈, 提出了一种从磁路到电路的等值转换模型, 实现了等值转换模型、对偶原理法、统一磁路法的统一; 针对自耦变压器, 文献[13]从单相三绕组自耦变压器的电磁关系入手, 推导了折算到高压侧的三绕组自耦变压器的等效电路; 针对多绕组中频变压器, 文献[14]建立了宽频模型, 并提出了寄生参数的实验提取方法。分析用于移动变电站的变压器的结构可知, 该变压器可等效为多绕组隔离变压器。相分量法是多绕组变压器建模的主要方法, 该方法物理意义明确, 通过节点导纳矩阵来描述变压器绕组连接特点和电气参数等信息^[15]。文献[16]利用相分量法建立了星形联结自耦变压器的全解耦模型。多数变压器建模方法由于精度而导致模型过于复杂, 难以快速进行仿真。

为在实验室环境下快速模拟三相隔离变压器运行时的输入、输出特性, 本文应用 Arnoldi 算法建立了该变压器的降阶模型, 并通过缩比实验平台验证了模型的正确性和精确性, 为电力变压器的设计和应用奠定了基础。与文献[17]中的模型相比, 本文所提出的模型进行了降阶计算, 模型运行速度更快; 与文献[18]所提出的变压器电路到磁路转换模型相比, 本文考虑了铁芯不同位置上磁通分布不均的因素, 模型能更准确地反映变压器地输入、输出关系; 与文献[19]所提出的模型相比, 本文所提出的模型计算了每匝线圈之间的互感, 使模型更准确。本文所提出的方法计算量较少, 且精度较高, 可以应用在实际场合。

1 多分接头变压器的等效结构

图 1 所示为移动变电站常用多分接头变压器的接线方式, 其绕组连接方式为 YNd11。实际的变压器包含多个分接头, 但其工作时仅有某一分接头工作, 本文仅以输出电压最高时的分接头为例进行分析。为确保变压器磁路平衡, 采用三个单相变压器构成组合型三相变压器, a 相变压器的绕组结构图如图 2 所示, 其相量图如图 3 所示。

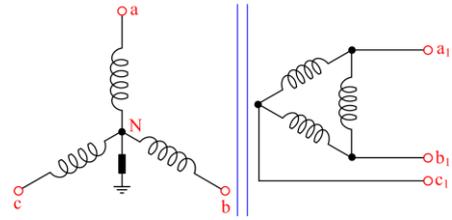


图 1 接线方案

Fig. 1 Wiring scheme of the transformer

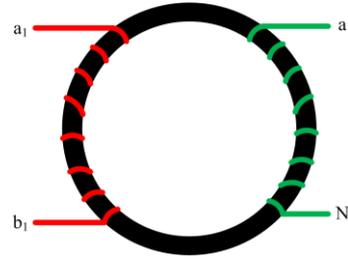


图 2 a 相变压器的绕组结构

Fig. 2 Transformer winding configuration of phase a

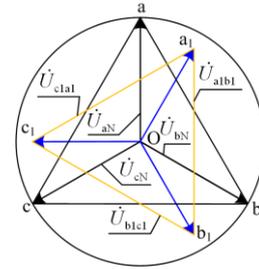


图 3 变压器的相量图

Fig. 3 Phasor diagram of the transformer

2 变压器的磁等效模型

图 1 中, 变压器由三个环形铁芯组成, 每个铁芯上有两个绕组, 每个芯柱内径 10 cm, 外径 20 cm, 横截面积为边长 10 cm 的正方形。忽略变压器的漏磁通, 根据电磁感应定律和安培定律, 可得到变压器的高保真磁等效电路, 如图 4 所示。

根据图 4, 可得到

$$\begin{cases} v_a - r_{na} i_a - L_{na} \frac{di_a}{dt} = N_Y \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_{a1} - r_{na1} i_{a1} - L_{na1} \frac{di_{a1}}{dt} = N_{\Delta} \frac{d\phi_a}{dt} \\ v_b - r_{nb} i_b - L_{nb} \frac{di_b}{dt} = N_Y \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_{b1} - r_{nb1} i_{b1} - L_{nb1} \frac{di_{b1}}{dt} = N_{\Delta} \frac{d\phi_b}{dt} \\ v_c - r_{nc} i_c - L_{nc} \frac{di_c}{dt} = N_Y \frac{d\phi_c}{dt} \\ v_{c1} - r_{nc1} i_{c1} - L_{nc1} \frac{di_{c1}}{dt} = N_{\Delta} \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： N_Y 为星形连接绕组的匝数； N_Δ 为三角形连接绕组的匝数。

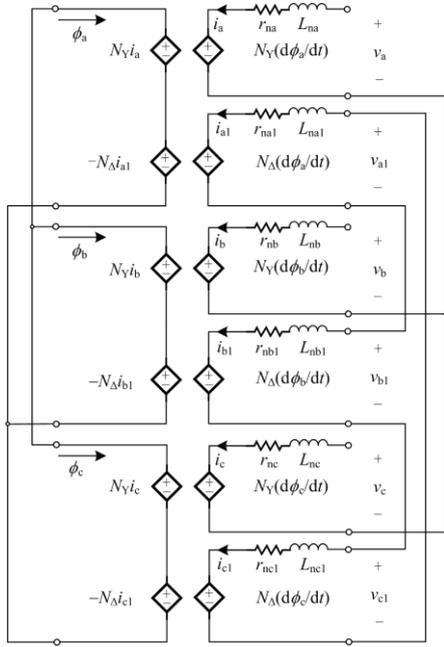


图4 变压器的高保真磁等效电路

Fig. 4 High-fidelity magnetic equivalent circuits of the transformer

变压器的磁等效建模方法有两种：一种是基于节点使用标量磁通势的方法，尽管这种方法适用于非导磁性材料的分析，但这种方法存在病态矩阵不饱和区域，不利于分析；另一种方法是基于网格的方法，使用网格将磁芯划分为一个个小区域，将磁通量等效为流过磁阻的电流。图5所示为磁芯的网格划分方法。

图5中，每个小正方形的大小相等，其中，黑色区域所示为第二区域。为简便起见，以a相为例进行分析。由于磁场的变化，磁性材料会产生涡流，从而导致铁芯内磁通势分布不均，因此，在存在涡流的情况下，磁芯被分为多个同心区域，每个区域内各正方形的磁通相等，每个区域都可以建模为一

组 $R-L$ 对。其中， R 为该区域内的磁阻， L 为该区域的磁感，铁芯的磁路等效模型如图6所示。

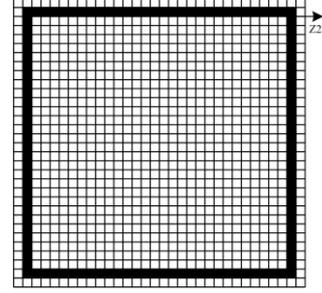


图5 磁芯的网格划分方法

Fig. 5 Detailed cross section of the magnetic core

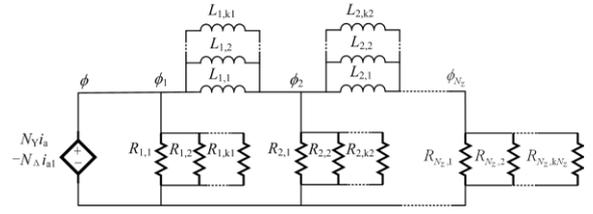


图6 铁芯的磁路等效模型

Fig. 6 Magnetic equivalent model of the iron core

根据图6，可得到

$$\begin{cases} R_{i-1}(\phi_{i-1} - \phi_i) - R_i(\phi_i - \phi_{i+1}) = L_{i-1} \frac{d\phi_i}{dt} \\ \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{i,1}} + \dots + \frac{1}{R_{i,ki}} \\ \frac{1}{L_i} = \frac{1}{L_{i,1}} + \dots + \frac{1}{L_{i,ki}}, \quad i=2, \dots, N_z \end{cases} \quad (2)$$

式中： R_i 为第 i 个磁区的磁阻； L_i 为第 i 个磁区的磁感； ϕ_i 为第 i 个磁区的磁通； $R_{i,ki}$ 为第 i 个磁区中第 i 个正方形磁通管的磁阻； $L_{i,ki}$ 为第 i 个磁区中第 i 个正方形磁通管的磁感； N_z 为磁区的数量； ki 为各磁区正方形磁通管的数量。

根据电磁感应定律和铁芯的磁路关系，式(2)中 R_i 和 L_i 可分别表示如下。

$$\begin{cases} R_i = \frac{1}{[\mu_0 \mu_r d^2 (\frac{2(N_z - i) + 1}{2\pi(r_{in} - d/2 - id)} + \frac{2(N_z - i) + 1}{2\pi(r_{in} + d/2 - id)}) + \sum_{j=1}^{2(N_z - k) - 1} \frac{\mu_0 \mu_r d^2}{\pi(r_{in} - d/2 + (i + j)d)}]}, \quad i=1, \dots, N_z - 1 \\ R_{N_z} = \frac{\pi(r_{in} + r_{out})}{\mu_0 \mu_r d^2} \\ L_i = \frac{1}{[\frac{d(2(N_z - i) + 1)}{2\pi\sigma d} (\frac{1}{r_{in} - d/2 + id} + \frac{1}{r_{out} - d/2 + id}) + \sum_{j=1}^{2(N_z - k) - 1} \frac{\mu_0 \mu_r d^2}{\pi\sigma d (r_{in} - d/2 + (i + j)d)}]}, \quad i=1, \dots, N_z - 1 \\ L_{N_z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A\dot{x}(t) = x(t) + b \\ y(t) = cx(t) \end{cases} \quad (9)$$

利用 Arnoldi 算法求解正交矩阵 V ，对状态方程进行降阶。

$$\begin{cases} V^T A V \dot{x}_r(t) = x(t) + b \\ y_r(t) = c V x_r(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中， r 为降阶后状态方程的阶数。

Arnoldi 算法的步骤如下：

- (1) 给定 n 维列向量 v_1 ，使向量 v_1 的范数 $\|v_1\|=1$ ；
- (2) 向量 $w_1 = A v_1$ ；
- (3) 计算矩阵 H 中的元素 $h_{1,j}$ ， $h_{1,j} = (A v_1, v_j)$ ；
- (4) 计算 $w_j = A v_j - h_{1,j} v_1 - h_{2,j} v_2 - \dots - h_{j,j} v_j$ ；
- (5) 计算 $h_{j+1,j}$ ， $h_{j+1,j} = (w_j, w_j)^{1/2}$ ；
- (6) 当 $h_{j+1,j} = 0$ 时，计算停止，当 $h_{j+1,j} \neq 0$ 时， $v_{i+1} = w_i / h_{j+1,j}$ ；
- (7) 如果 $j < n$ ， $j = j + 1$ ，从(3)重新开始计算，如果 $j \geq n$ ，计算停止；
- (8) 计算残差 r_i ， $r_i = \varepsilon_i / [\sigma (1 - h_{ii})^{1/2}]$ ，当 $\sigma \leq 10^{-7}$ 时，计算停止，否则从(3)重新开始计算。

4 仿真与实验验证

为验证理论分析的正确性，搭建了用于移动变电站的三相隔离变压器的等比例缩小实验平台，进行了相应的仿真与实验验证。仿真与实验条件如下：

- (1) 变压器铁芯由硅钢片组成，铁芯可等效为三个完全相同的环形铁，每个铁芯上有两个绕组，变压器原、副边匝比为 $N_\Delta : N_Y = 5\sqrt{3} : 1$ ，匝数为 $N_\Delta = 8660$ ， $N_Y = 1000$ ；每个铁芯内径 10 cm，外径 20 cm，横截面积为边长 10 cm 的正方形，每个磁区的小正方形边长为 0.1 mm；
- (2) 变压器角形连接绕组接入有效值 160 V 的工频三相交流电压，星形连接绕组接 10 Ω 的三相负载。

根据 Arnoldi 算法的步骤编写 Matlab 程序，将状态方程进行降阶，当残差小于 10^{-7} 时，迭代停止。残差随迭代次数变化曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出，当迭代次数为 186 次时，残差小于 10^{-7} ，满足误差要求，迭代停止，状态方程阶数由 1000 降低到 186，模型运算次数由 1000^2 降低至 186^2 ，在保证模型准确性的前提下，模型运算量减少 28.9 倍，运行速度加快 28.9 倍。

图 10 所示为电阻负载条件下 a 相的输入电压和输入电流的仿真结果。由图 10 可以看出，电阻负载条件下，变压器输入电流滞后输入电压一定的相位角度，是因为漏感以及磁感的存在，变压器的输入阻抗呈感性。

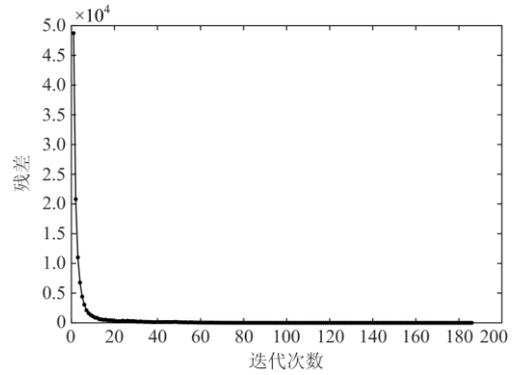


图 9 残差随迭代次数变化曲线

Fig. 9 Residual variation curve with iteration times

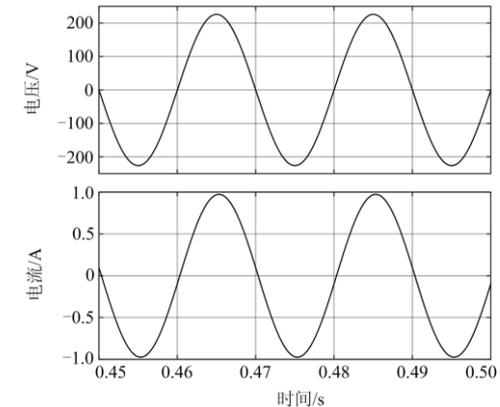


图 10 电阻负载条件下 a 相的输入电压和输入电流

Fig. 10 Input voltage and input current of phase a under resistive load conditions

图 11 所示为电阻负载条件下变压器输入电压的实验结果。图 12 所示为电阻负载条件下变压器输入电流的实验结果。比较图 11 和图 12 可以看出，实验中，变压器相电压超前电流一定相位角度，仿真与实验结果相符合。图 12 中，电流发生些许畸变，因为实际情况下，变压器结构不对称以及三相负载的不平衡产生特征次电流谐波。

为了体现降阶模型的准确性，分别比较工频三相电压激励下、阶跃激励下以及方波激励下原模型和降阶模型的输入、输出特性。

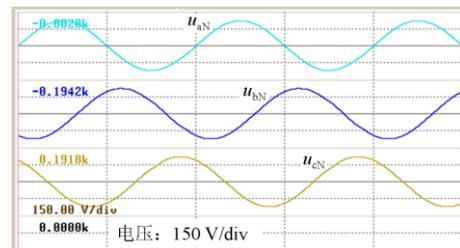


图 11 变压器输入线电压

Fig. 11 Input voltage of the transformer

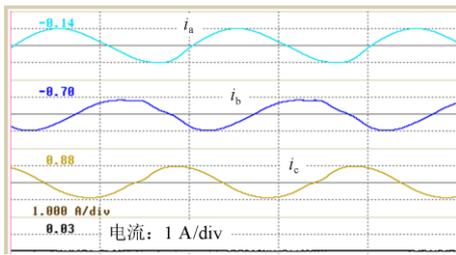


图 12 变压器输入电流

Fig. 12 Input current of the transformer

图 13 所示为工频三相电压激励下原模型和降阶模型 a 相输入电流波形。图中, 三相输入电压有效值为 150 V, i_{a1-m} 为原模型输入电流, i_{a1-L} 为降阶模型输入电流。由图中可以看出, 降阶模型波形能够很好地跟随原模型波形, 与原模型相比, 降阶模型仍具有较高的精确度。

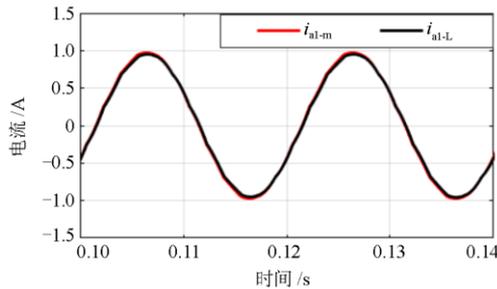


图 13 原模型和降阶模型变压器输入电流

Fig. 13 Input current of the transformer of un-reduced order model and reduced order model

图 14 所示为工频三相电压激励下原模型和降阶模型 a 相输出电流波形。图中, 三相输入电压有效值为 150 V, i_{a2-m} 为原模型输出电流, i_{a2-L} 为降阶模型输出电流。由图中可以看出, 降阶以后模型的输出电流和原模型的输出电流基本重合。

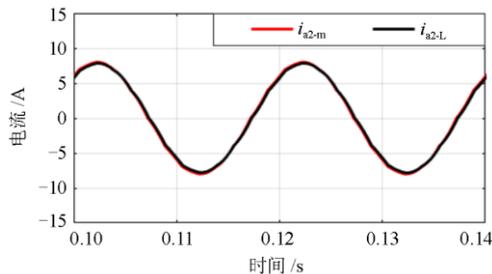


图 14 原模型和降阶模型变压器输出电流

Fig. 14 Output current of the transformer of un-reduced order model and reduced order model

图 15 所示为工频三相电压激励下原模型和降阶模型 a 相输出电压波形。图中, 三相输入电压有

效值为 150 V, u_{a2-m} 为原模型输出电压, u_{a2-L} 为降阶模型输出电压, 图中 0.11 s 时原模型和降阶模型电压存在陷波, 因为建模过程中将硅钢片的 $B-H$ 曲线进行分段线性化, 其拐点附近铁芯的磁导率存在较大误差, 在降阶模型中, 这些点的误差放大, 使模型输出发生波动。

图 16 所示为阶跃电压激励下原模型和降阶模型 a 相输出电压波形。图中, 阶跃电压幅值为 150 V, u_{a2-m} 为原模型输出电压, u_{a2-L} 为降阶模型输出电压。由图中可以看出, 相比于阶跃电压, 原模型和降阶模型输出电压会产生延迟效应, 因为建模过程中, 考虑了变压器的漏感, 由于电感的滤波作用, 输出电压趋于平缓。

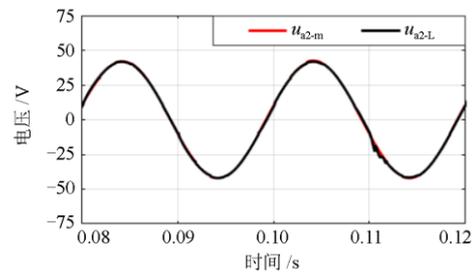


图 15 原模型和降阶模型变压器输出电压

Fig. 15 Output voltage of the transformer of un-reduced order model and reduced order model

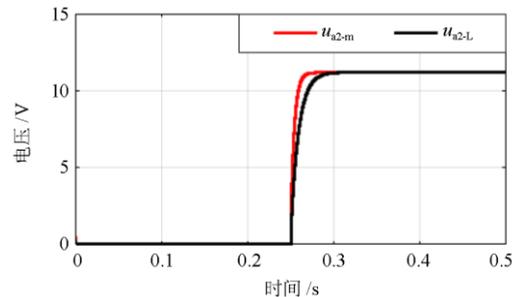


图 16 原模型和降阶模型变压器输出电压

Fig. 16 Output voltage of the transformer of un-reduced order model and reduced order model

图 17 所示为方波电压激励下原模型和降阶模型变压器 a 相输出电压波形。图中, 方波输入电压幅值为 150 V, 频率为 50 Hz, u_{a2-m} 为原模型输出电压, u_{a2-L} 为降阶模型输出电压。从图中可以看出, 原模型和降阶模型的输出电压波形基本重合。

综合图 13—图 17 可以看出, 在正弦激励、阶跃激励以及方波激励条件下, 降阶模型的输出特性与原模型基本相同, 降阶模型具有较高的准确度。

为了更好地验证降阶模型在实际情况下的工作

情况，分别将理想变压器、原模型、降阶模型应用在 6 脉波整流器中，测量其输出特性。图 18 所示为使用星角变压器的 6 脉波整流器。图中，由于大电感的滤波作用，移相变压器的输入电流近似为正弦，由于整流器件的强非线性，变压器输入电压 u_{An1} 和输出电压 u_{a1n} 含有大量的 $6k \pm 1$ 次谐波，整流器输入电压由 6 个阶梯组成。

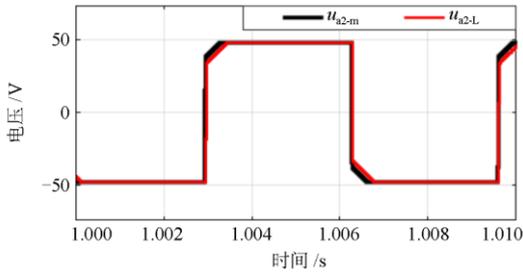


图 17 原模型和降阶模型变压器输出电压

Fig. 17 Output voltage of the transformer of unreduced order model and reduced order model

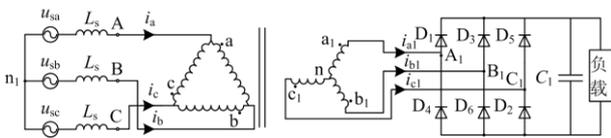


图 18 使用星角连接变压器的 6 脉波整流器

Fig. 18 6-pulse rectifier using Y-Δ transformer

图 19 所示为使用理想变压器时变压器 a 相输出电压波形。图中，电源电压有效值为 220 V，频率为 50 Hz。从图中可以看出，变压器输出电压为标准 6 阶梯波。

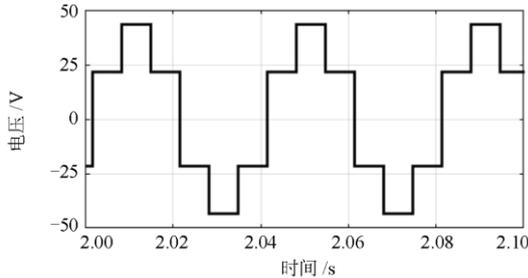


图 19 使用理想变压器时变压器输出电压

Fig. 19 Output voltage of the transformer using ideal transformer

图 20 所示为使用原模型时变压器 a 相输出电压波形。图中，电源电压有效值为 220 V，频率为 50 Hz。从图中可以看出，一个电源周期内，变压器输出电压由 6 个阶梯组成，由于变压器漏感以及铁芯磁饱和效应的影响，电压波形会发生畸变，阶梯更加平缓。

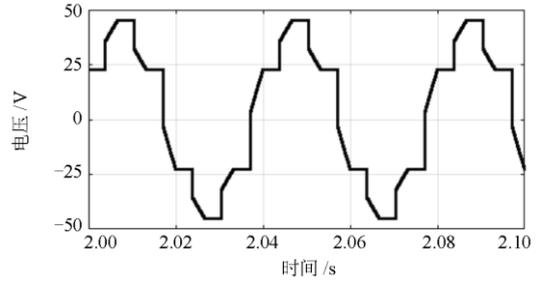


图 20 使用原模型时变压器输出电压

Fig. 20 Output voltage of the transformer using unreduced order model

图 21 所示为使用降阶模型时变压器 a 相输出电压波形。图中，电源电压有效值为 220 V，频率为 50 Hz。从图中可以看出，与原模型相比，降阶模型中变压器的输出电压基本不会发生变化，降阶模型具有较高的准确性。

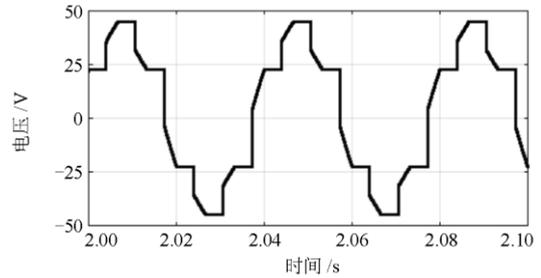


图 21 使用降阶模型时变压器输出电压

Fig. 21 Output voltage of the transformer using reduced order model

为了研究分段线性化后的 $B-H$ 曲线对降阶模型输出结果的影响，在图 8 的基础上进一步细分 $B-H$ 曲线的分段线性化区间，使其准确度更高，细分后的 $B-H$ 曲线如图 22 所示。

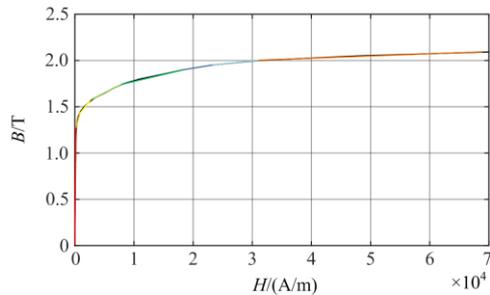


图 22 细分后的 $B-H$ 曲线

Fig. 22 $B-H$ curve after subdivided piecewise linearization

图 22 中，当 $H < 100$ 时， $\mu_0 = 1.3 \times 10^{-3}$ ；当 $100 < H < 1000$ 时， $\mu_0 = 1.4 \times 10^{-4}$ ；当 $1000 < H < 3000$ 时， $\mu_0 =$

5.5×10^{-5} ; 当 $3000 < H < 8000$ 时, $\mu_0 = 3.4 \times 10^{-5}$; 当 $8000 < H < 18000$ 时, $\mu_0 = 9 \times 10^{-6}$; 当 $18000 < H < 23000$ 时, $\mu_0 = 6.2 \times 10^{-6}$; 当 $23000 < H < 31000$ 时, $\mu_0 = 4.5 \times 10^{-6}$; 当 $H > 31000$ 时, $\mu_0 = 2.32 \times 10^{-6}$ 。

图 23 所示为使用图 8 中 $B-H$ 曲线时, 降阶模型的输出电压波形以及使用图 22 中 $B-H$ 曲线时, 降阶模型的输出电压波形。图中, 变压器输入电压有效值为 150 V, 频率为 50 Hz, u_{a2-L1} 为使用图 8 中 $B-H$ 曲线时, 降阶模型的输出电压, u_{a2-L2} 为使用图 22 中 $B-H$ 曲线时, 降阶模型的输出电压。由图 23 中可以看出, 两种 $B-H$ 曲线条件下变压器输出电压波形基本相同, 使用图 8 中 $B-H$ 曲线时, 降阶模型的输出电压会产生陷波, 是因为图 8 中 $B-H$ 曲线拐点附近存在较大误差。由图 23 可以看出, $B-H$ 曲线的分段线性化基本会对模型的准确性产生影响, 分段线性化后的曲线越接近原曲线, 模型的准确度越高。

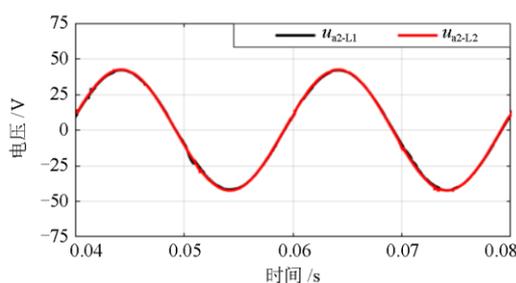


图 23 变压器输出电压

Fig. 23 Output voltage of the transformer

5 结论

针对应用于移动变电站的三相隔离变压器, 本文应用 Arnoldi 算法建立了其降阶模型。根据电磁感应定律和安培定律, 搭建了变压器的高精度电磁等效电路, 并得到了输入电压、电流与磁通量变化率之间的定量关系。应用分块近似方法将变压器磁芯等效为多组环形回路, 得到了铁芯的磁路等效模型。由铁芯的磁等效模型得到了磁阻、磁感与磁通量以及磁通量变化率之间的函数关系, 进而得到了变压器的状态方程。应用 Arnoldi 算法将状态方程进行降阶, 得到了变压器的降阶模型, 并进行相应的仿真与实验验证。仿真与实验结果表明, 本文所建立的模型能够快速模拟电力变压器的实际运行状态, 所提出模型的方法主要与铁芯的磁通分布、 $B-H$ 曲线的分段线性化以及所划分磁区的数量有关。

参考文献

[1] 李顺昕, 何知遥, 丁健民, 等. 基于 OD 矩阵的电动出

租车充电负荷时空特性预测分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 88-96.

LI Shunxin, HE Zhiyao, DING Jianmin, et al. Prediction and analysis of spatial-temporal characteristics of electric taxis' changing load based on OD matrix[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 88-96.

[2] HAMOUD G A, YIU C. Use of mobile unit substations in redundant customer delivery systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1403-1409.

[3] 车勇, 孙伟, 张艳, 等. 电网静态安全条件下配电参数抗干扰控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(9): 43-49, 56.

CHE Yong, SUN Wei, ZHANG Yan, et al. Research on anti-interference control method for power distribution parameters under static safety conditions of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(9): 43-49, 56.

[4] 翟永杰, 杨旭, 彭雅妮, 等. 基于计算机听觉技术的电力设备状态监测研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 24-32.

ZHAI Yongjie, YANG Xu, PENG Yani, et al. Research overview on state monitoring of electrical equipment based on computer hearing technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 24-32.

[5] HAMOUD G A. Assessment of spare transformer requirements for distribution Stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 174-180.

[6] HAMOUD G A, YIU C. One Markov model for spare analysis of distribution power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1643-1648.

[7] 汤振鹏, 刘泽庭, 胡中, 等. 移动变电站技术进展综述[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3415-3423.

TANG Zhenpeng, LIU Zeting, HU Zhong, et al. Overview on technology progress in mobile substation[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3415-3423.

[8] 时珉, 周海, 韩雨彤, 等. 一种考虑季节特性的光伏电站多模型功率预测方法[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 75-82.

SHI Min, ZHOU Hai, HAN Yutong, et al. A multi-model power forecasting approach of photovoltaic plant based on seasonal characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 75-82.

[9] 刘英. 移动式变电站的发展前景[J]. 电气制造, 2014(4): 46-47.

LIU Ying. Development prospect of mobile substation[J]. Electrical Manufacturing, 2014(4): 46-47.

[10] LOPEZ-ROLDAN J, DEVRIENDT C, ENNS J, et al.

- How to achieve a rapid development of mobile substation and to guarantee its integrity during transport[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 196-202.
- [11] 涂昊曦, 戴志勇, 李辉, 等. 220 kV/20 kV SF6 气体变压器技术参数和试验技术研究[J]. 变压器, 2015, 52(12): 19-25.
- TU Haoxi, DAI Zhiyong, LI Hui, et al. Research on 220 kV/20 kV SF6 gas transformer technical parameters and test technology[J]. Transformer, 2015, 52(12): 19-25.
- [12] 尹璇, 邓祥力. 用于绕组变形检测的电力变压器 集总参数等效模型研究[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(6): 604-608.
- YIN Xuan, DENG Xiangli. Research on equivalent model of lumped parameters of power transformer for winding deformation detection[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(6): 604-608.
- [13] 章彬, 伍国兴, 黄炜昭, 等. 一种新的变压器磁路到电路的转换模型及多种方法的统一[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 128-135.
- ZHANG Bin, WU Guoxing, HUANG Weizhao, et al. A new conversion model of transformer from magnetic circuit to electric circuit and the unification of various methods[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 128-135.
- [14] 张也, 曹楠, 章彬, 等. 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 45-51.
- ZHANG Ye, CAO Nan, ZHANG Bin, et al. A new nonlinear model of three-winding autotransformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 45-51.
- [15] 刘洋, 刘洋, 许立雄, 等. 海量数据驱动的变压器故障类型高性能诊断方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 88-95.
- LIU Yang, LIU Yang, XU Lixiong, et al. High performance diagnostic method of transformer fault type based on mass data driving[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 88-95.
- [16] OLIVIER G, COJOCARU R, LEFÈVRE A. Analytical model of a T-connected three-phase transformer[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 63: 407-419.
- [17] 孟凡刚, 骆霁嵘, 高蕾, 等. 基于相分量法的星形自耦变压器的全解耦模型[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1): 14-21.
- MENG Fangang, LUO Jirong, GAO Lei, et al. Decoupled model of star-connected autotransformer based on phase-coordinate method[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(1): 14-21.
- [18] 姚陈果, 胡迪, 赵仲勇, 等. 基于有限元法的电力变压器绕组集总参数电路仿真建模[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3517-3523.
- YAO Chenguo, HU Di, ZHAO Zhongyong, et al. Simulation modeling of lumped parameter circuit for power transformer winding based on the finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3517-3523.
- [19] 章彬, 伍国兴, 黄炜昭, 等. 一种新的变压器磁路到电路的转换模型及多种方法的统一[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 128-135.
- ZHANG Bin, WU Guoxing, HUANG Weizhao, et al. A new conversion model of transformer from magnetic circuit to electric circuit and the unification of various methods[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 128-135.
- [20] 熊郁芬, 苏洁莹, 王奖, 等. 含多园区综合能源系统的配电网双层分布式调度[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 53-61.
- XIONG Yufen, SU Jieying, WANG Jiang, et al. Bi-level distributed scheduling for distribution network with integrated energy system in parks[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 53-61.
- [21] 刘毓梅, 赵巧娥, 高戈, 等. 弱电网下 LCLCL 型并联逆变器并网系统的电流优化控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 122-127, 132.
- LIU Yumei, ZHAO Qiao'e, GAO Ge, et al. Current optimal control of grid-connected system of LCLCL type parallel inverter under weak grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 122-127, 132.
- [22] 李正明, 钱露先, 李加彬. 基于统计特征与概率神经网络的变压器局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 55-60.
- LI Zhengming, QIAN Luxian, LI Jiabin. Type recognition of partial discharge in power transformer based on statistical characteristics and PNN[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 55-60.
- [23] YANG Tao, BOZHKO S, ASHER G. Fast functional modelling of diode-bridge rectifier using dynamic phasors[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 947-956.
- [24] 张杰, 罗隆福, AGGARWAL R K, 等. 基于多线圈耦合的新型换流变压器仿真模型设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 1945-1952.

- 2010, 25(11): 68-79.
ZHANG Jie, LUO Longfu, AGGARWAL R K, et al. Simulation model's design of a new converter transformer based on multi-coil coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 68-79.
- [25] 高蕾, 佟为明, 孟凡刚. 三角形联结六相自耦变压器不对称模型[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 1-8.
GAO Lei, TONG Weiming, MENG Fangang. Asymmetrical model of six-phase delta-connected autotransformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 1-8.
- [26] 张喜乐, 梁贵书, 董华英, 等. 变压器绕组的特快速暂态建模[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 55-59, 78.
ZHANG Xile, LIANG Guishu, DONG Huaying, et al. Modeling for simulating very fast transient in transformer windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 55-59, 78.
- [27] 赵亮亮, 陈超英. 电力系统暂态仿真中自耦变压器模型的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 83-88.
ZHAO Liangliang, CHEN Chaoying. Study of model of three-phases autotransformer in electric system transient simulation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(1): 83-88.
- [28] 钟成, 苏汉, 金志杰, 等. 基于扩展相分量法的 OPGW 系统接地短路电流计算[J]. 电测与仪表, 2017, 54(10): 117-122.
ZHONG Cheng, SU Han, JIN Zhijie, et al. The analysis of grounding fault current distribution in OPGW system based on the improved phase component method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(10): 117-122.
- [29] YANG Tao, BOZHKO S, ASHER G. Functional modeling of symmetrical multipulse autotransformer rectifier units for aerospace applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 30(9): 4704-4713.

收稿日期: 2020-02-18; 修回日期: 2020-07-19

作者简介:

高美金(1980—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统与变电站设计; E-mail: 550650305@qq.com

狄 谦(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为移动变电站设计; E-mail: diqian07@163.com

王婷婷(1990—), 女, 工程师, 主要研究方向为电力系统与变电站设计; E-mail: 863494191@qq.com

孟凡刚(1982—), 男, 通信作者, 副教授, 博导, 研究方向为电能变换与控制。E-mail: mfg0327@sina.com

(编辑 魏小丽)