

不同负载下变压器超高次谐波传递特性研究

段锐敏¹, 何杰², 郭成¹, 周福林²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 随着电力系统电力电子化程度的提高, 系统中超高次谐波(2~150 kHz)问题日益严重。为研究超高频谐波流经变压器的传递特性, 在变压器高频谐波电路模型的基础上, 基于电路分析原理, 推导了变压器谐波传递特性函数, 分析了不同负载情况下, 变压器谐波电压传递特性; 考虑实际工程应用中负载的复杂性, 进一步探究了不同功率因数负载下电压传递特性的变化情况; 揭示了寄生参数、负载性质和谐振频率与传递特性之间的关系, 由于寄生电容的影响, 变压器电压传输比不再恒定不变, 而是随着频率的增加, 会在极点谐振处出现放大现象, 在零点谐振处出现趋于零的现象; 通过仿真验证了变压器传递特性的准确性; 对分析和解决电力系统中超高次谐波问题具有参考价值。

关键词: 传递特性; 超高次谐波; 谐波模型; 负载性质; 寄生参数

Research on supraharmonics transfer characteristics of transformer with different loads conditions

DUAN Ruimin¹, HE Jie², GUO Cheng¹, ZHOU Fulin²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Electrical Engineering College, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With the improvement of power electronics in power systems, supraharmonics(2~150 kHz) has become a new power quality problem. To study the transfer characteristics of supraharmonics through transformer, based on the high frequency harmonic circuit model of transformer and the principle of circuit analysis, the transfer characteristics function of transformer is derived. Analyzing the harmonic voltage transfer characteristics of transformer with different load conditions, and considering the load complexity in practical engineering application, the variation rules of voltage transfer characteristics with different power factors is further explored. It also reveals the relationship between the parasitic parameters, the load characteristics resonance frequency and transfer characteristics. Due to the influence of parasitic capacitance, the transformer voltage ratio changes with frequency, and the maximum gain at the pole resonance and the minimum gain at the zero resonance. The simulation verifies the accuracy of the transformer's transfer characteristics, which has the reference value for the analysis and solution of the supraharmonic problem in the power system.

Keywords: transfer characteristics; supraharmonics; harmonic source model; load characteristic; parasitic parameter

0 引言

随着光伏并网^[1]、新能源汽车^[2]和高速铁路^[3]蓬勃发展,使得电力系统中超高次谐波问题日益严重^[4-6]。变压器是超高次谐波传递路径中关键设备,电动汽车充电桩、光伏逆变器及牵引负荷产生的超高次谐波通过变压器传递到电网中。在能量传递的过程中,变压器中的寄生电容参数可能与漏感产生特定次谐振,导致谐波含量被放大,从而影响变压器性能。因此,有必要掌握变压器超高次谐波传递特性。

当前,国内外主要对中低频谐波进行研究。文献[7]就不同耦合系数下谐波电压传递特性进行了分析研究,但未曾考虑分布电容的影响;文献[8]对变压器一二次的谐波电压关系进行了量化,但忽略了变压器各层间分布电容的影响;文献[9]建立了详细的电力系统谐波传递网络模型,明确了光伏逆变器的滤波器参数会使得谐波电压放大,但并未考虑变压器寄生参数对超高频谐波传递的影响;文献[10]用漏感和匝数比来描述变压器高频模型,没有考虑寄生电容对电压波形的影响。当频率很高时,分布电容中的位移电流会对外电路产生分路,尤其是外电路阻抗值大时,影响更明显。故在研究超高频谐波下变压器的谐波传递特性时,有必要分析分布电容的影响。

本文在变压器空载及负载情况下建立了含寄生电容的变压器谐波模型;基于谐波模型对电压谐波传递特性进行分析,并推导了变压器谐波传递特性函数;揭示了寄生参数、负载性质与谐振频率之间的关系;最后,通过仿真验证了变压器传递特性的准确性。

1 变压器超高次谐波模型

建立能准确描述变压器在超高次谐波条件下的数学模型,对分析和解决电力系统中超高次谐波问题有着重要意义。

常见的变压器谐波模型包括三电容等效电路模型、五电容等效电路模型和六电容等效电路模型。研究表明,在实际工程应用中,变压器谐波模型具有参数计算简便、准确度较高的优势^[11],故本文选择该结构作为变压器谐波电路模型,并基于此模型分析谐波传递特性。变压器三电容等效电路模型如图1所示。

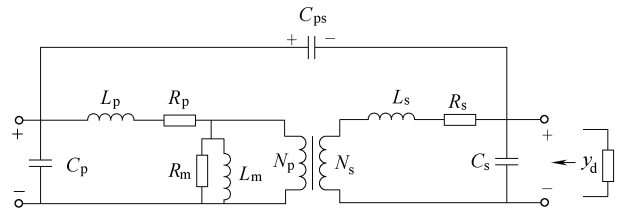


图1 变压器高频电路模型

Fig. 1 Transformer high frequency circuit model

图中, R_p 、 R_s 分别为一二次绕组的电阻; L_p 、 L_s 分别为一二次回路的漏电感; L_m 为励磁电感; R_m 为磁心内部的涡流和磁滞损耗的等效电阻; C_p 、 C_s 分别为一二次绕组的集总电容; C_{ps} 为一二次绕组间的集总电容; N_p 、 N_s 分别为一二次绕组匝数,令 $k=N_p/N_s$ 。

2 变压器超高次谐波传递函数推导

2.1 变压器超高次谐波传递函数

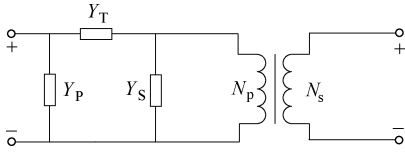
虽然图1给出了变压器的高频谐波的电路模型,但是不能直观反映一二次的电压关系,下面根据电路原理,将变压器二次电路等效折算至一次,推导该变压器的谐波传递函数。为进一步简化电路,合并一次侧绕组的内阻抗,则漏磁支路可转换为绕组 R_s 和漏感 L_s 的串联支路。

$$Z_{LS} = Z_{11} + k^2 Z_{12} = k^2 (R_s + j\omega L_s) \quad (1)$$

负载可相当于寄生电容 C'_s 对应的导纳由 $j\omega C'_s$ 变为 $j\omega C'_s + y'_d$ 。于是折算后的变压器谐波模型如图2所示。

图2中各导纳表达式为

$$Y_T = j\omega \frac{1}{k} C_{ps} + Y_{LS} \quad (2)$$

图2 变压器谐波模型的 π 形结构Fig. 2 π -type structure of transformer harmonic model

$$Y_P = j\omega \left(C_p + \left(1 - \frac{1}{k} \right) C_{ps} \right) + Y_M \quad (3)$$

$$Y_S = j\omega \left(\frac{1}{k^2} C_s + \frac{1}{k} \left(\frac{1}{k} - 1 \right) C_{ps} \right) + \frac{y_d}{k^2} \quad (4)$$

$$\text{其中, } Y_{LS} = \frac{1}{Z_{LS}} Y_M = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{j\omega L_m}。$$

由图2所示的简化变压器谐波模型可得负载情况下的电压传递特性函数 H_{ud} 为

$$H_{ud} = \frac{1}{k} \frac{Y_T}{Y_S + Y_T} \quad (5)$$

式(5)给出了变压器带载时电压传递特性函数。由此可以分析寄生参数、负载对变压器传递特性的影响规律。

2.2 空载电压传递函数

变压器二次侧空载时, 即 $y_d = 0$ 时, 由式(5)可得空载情况下的电压传递特性函数 H_{uo} 为

$$H_{uo} = \frac{j\omega C_{ps} + k Y_{LS}}{j\omega (C_s + C_{ps}) + k^2 Y_{LS}} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 在低频情况下, 有 H_{uo} 趋近于 $1/k$, 这说明低频段时, 电压传输比趋近于一二次绕组匝数比的倒数, 随着频率的增加, 由于寄生电容的存在, 传输比将发生改变。由式(6)可知, H_{uo} 存在两个谐振点, 分别是极点谐振频率 f_u 和零点谐振频率 f_{u0} , 即

$$f_u = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s (C_{ps} + C_s)}} \quad (7)$$

$$f_{u0} = \frac{1}{2\pi \sqrt{k C_{12} L_s}} \quad (8)$$

变压器内部发生极点谐振时, 二次电压幅

值将会放大; 变压器发生零点谐振时, 二次电压幅值将会降低。

2.3 电阻负载下的电压传递函数

当二次侧接纯电阻负载时, 即 $y_d = \frac{1}{r_d}$ 时,

负载电压传递特性函数 H_{ud} 为

$$H_{ud} = \frac{j\omega C_{ps} + k Y_{LS}}{j\omega (C_s + C_{ps}) + k^2 Y_{LS} + \frac{1}{r_d}} \quad (9)$$

由式(6)和式(9)可以看出, 空载电压传递特性函数 H_{uo} 与负载电压传递特性函数 H_{ud} 存在相同的零点谐振频率, 而极点谐振频率的大小取决于后接负载的性质。

2.4 电感负载下的电压传递函数

当二次侧接电感负载时, 即 $y_d = \frac{1}{j\omega l_d}$ 时,

负载电压传递特性函数 H_{ud} 为

$$H_{ud} = \frac{j\omega C_{ps} + k Y_{LS}}{j\omega (C_s + C_{ps}) + k^2 Y_{LS} + \frac{1}{j\omega l_d}} \quad (10)$$

此时, 极点谐振频率 f_{ul} 为

$$f_{ul} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(C_{ps} + C_s) \left(\frac{l_d l_s}{l_d + l_s} \right)}} = \sqrt{1 + \frac{l_s}{l_d}} f_{uo} \quad (11)$$

由式(11)可知, 当 $l_d \gg l_s$ 时, f_{ul} 与 f_{uo} 几乎相等。为定量分析电感负载对极点谐振频率的影响情况, 现做如下定义

$$\gamma = \left| \frac{f_{uo} - f_{ul}}{f_{uo}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

由式(12)所得结果如图3所示, 由图3可以看出, 当负载电感大于10倍漏感值时, 谐振频率偏移率小于5%, 此时的 f_{uo} 与 f_{ul} 几乎相等。常见变压器的耦合系数一般较高, 故其漏感一般均较小, 相比之下, 电感负载往往比漏感大得多。因此, 电感负载对变压器极点谐振频率的影响较小。

2.5 电容负载下的电压传递函数

当二次侧接电容负载时, 即 $y_d = j\omega C_d$ 时,

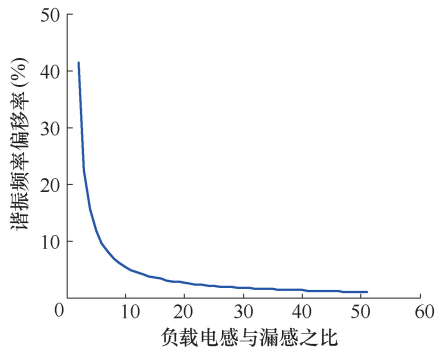


图3 负载电感与漏感的比值与谐振频率偏移率的关系图
Fig. 3 Diagram of the ratio of load inductance to leakage inductance and resonance frequency offset rate

负载电压传递特性函数 H_{ud} 为

$$H_{uc} = \frac{j\omega C_{ps} + kY_{LS}}{j\omega(C_s + C_{ps}) + k^2 Y_{LS1} + j\omega C_d} \quad (13)$$

此时, 极点谐振频率 f_{uc} 为

$$\begin{aligned} f_{uc} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_{ps} + C_s + C_d)l_s}} \\ &= \sqrt{\frac{C_{ps} + C_s}{C_{ps} + C_s + C_d}} f_{uo} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_d}{C_{ps} + C_s}}} f_{uo} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可看出, 电容负载 C_d 会使得极点频率有所降低。同理定量分析电容负载对极点谐振频率的影响情况, 结果如图4所示。

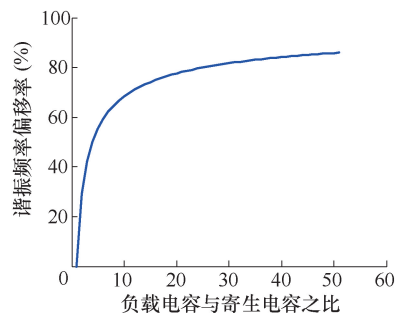


图4 负载电容与寄生电容的比值与谐振频率偏移率的关系图

Fig. 4 Diagram of the ratio of load capacitance to parasitic capacitance and resonance frequency offset rate

由图4可以看出, 当寄生电容远大于负载

电容时, f_{uc} 相比 f_{uo} 几乎不变; 当负载电容大于5倍寄生电容时, 谐振频率偏移率超过55%。此时, 变压器谐振频率向频带更低处移动。

3 变压器超高次谐波传递特性仿真分析

3.1 传递函数的验证

为验证变压器超高次谐波传递特性的正确性, 基于 MATLAB/Simulink 软件对电压传递特性的有效性进行仿真比较。并分析变压器后接阻性负载、阻容性负载、阻感性负载及空载时对电压传递特性的影响规律。实验室变压器参数如表1所示, 其中三电容的值由文献[12]提供的方法获得, 按照表1参数搭建出变压器仿真模型。

表1 变压器仿真参数

Tab. 1 Transformer simulation parameters

参数	数值	参数	数值
内阻 R_s/Ω	0.400 7	一二次电压比	10/0.38
漏感 L_s/mH	39	激磁电阻 $R_m/\text{k}\Omega$	188
绕组电容 C_{ps}/nF	15	激磁电感 L_m/H	13 500
一次层间电容 C_p/nF	7.5	二次层间电容 C_s/nF	7.5
电感负载 L_d/H	1000	电容负载 C_d/nF	65
电阻负载 $R_d/\text{k}\Omega$	10		

当变压器空载及负载时, 仿真及理论推导的电压传递特性曲线如图5所示。本文将频率带划分为3段; 50~2 000 Hz 为频段 A; 2 000~6 000 Hz 为频段 B; 大于6 000 Hz 为频段 C。

由图5可以看出:

1) 仿真结果与理论推导结果几乎一致, 可以证明公式推导的正确性。

2) 本文中的变压器在各频段中传递电压信号时, 并不按电压比进行传递, 而是随频率发生变化。在频段 A 中, 放大倍数在 1 300 Hz 附近接近 0, 这是由于在此频率附近发生了零点谐振, 而频段内其余频率处的放大倍数较 50 Hz 略有上升; 在频段 B 中, 放大倍数在极点谐振处最大; 在频段 C 中, 放大倍数较 50 Hz 有所上升。

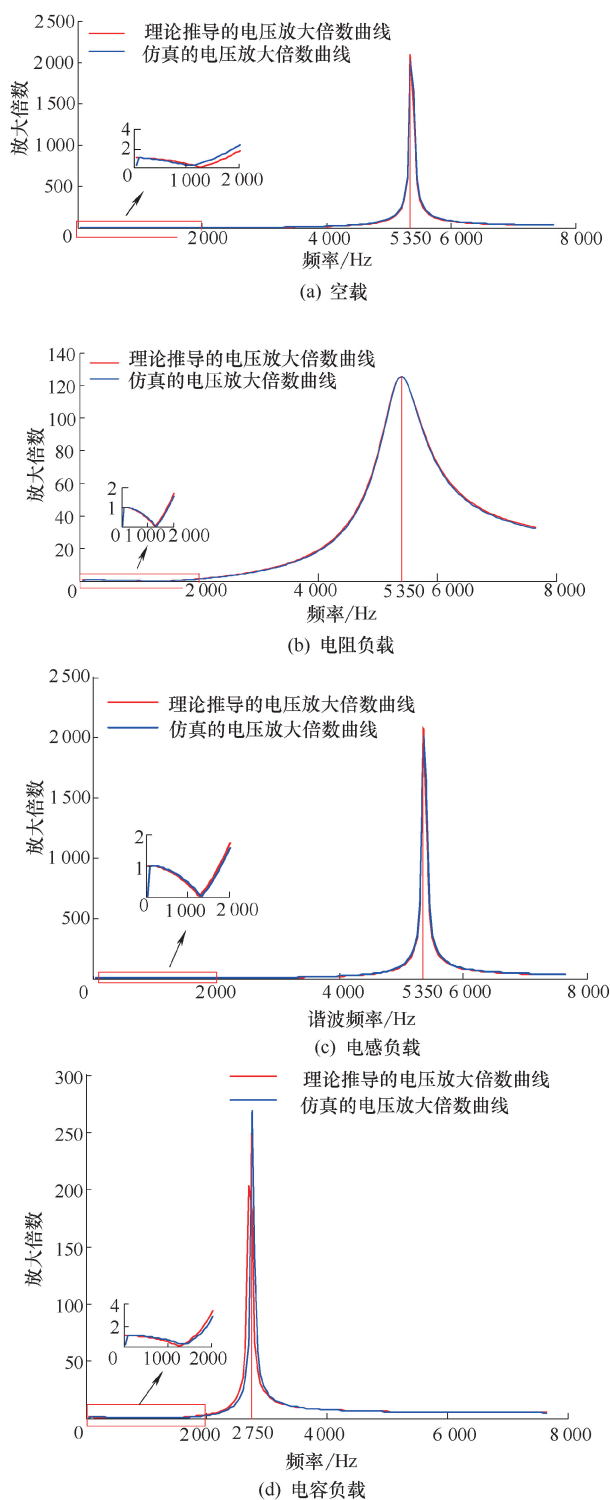


图5 仿真与理论推导的电压传递特性曲线

Fig. 5 Voltage transfer characteristic curve of simulation and theoretical derivation

3) 负载性质对电压传递特性有影响。其中电容负载下, 极点谐振频率向更低处移动,

在本文中由 5 350 Hz 移动到 2 750 Hz; 电感负载和电阻负载均不会改变极点谐振频率。

3.2 负载对电压传递函数的影响

当变压器后接不同数值的阻性负载、感性负载及容性负载时, 变压器传递特性曲线如图 6 所示。负载参数值如表 2 所示。

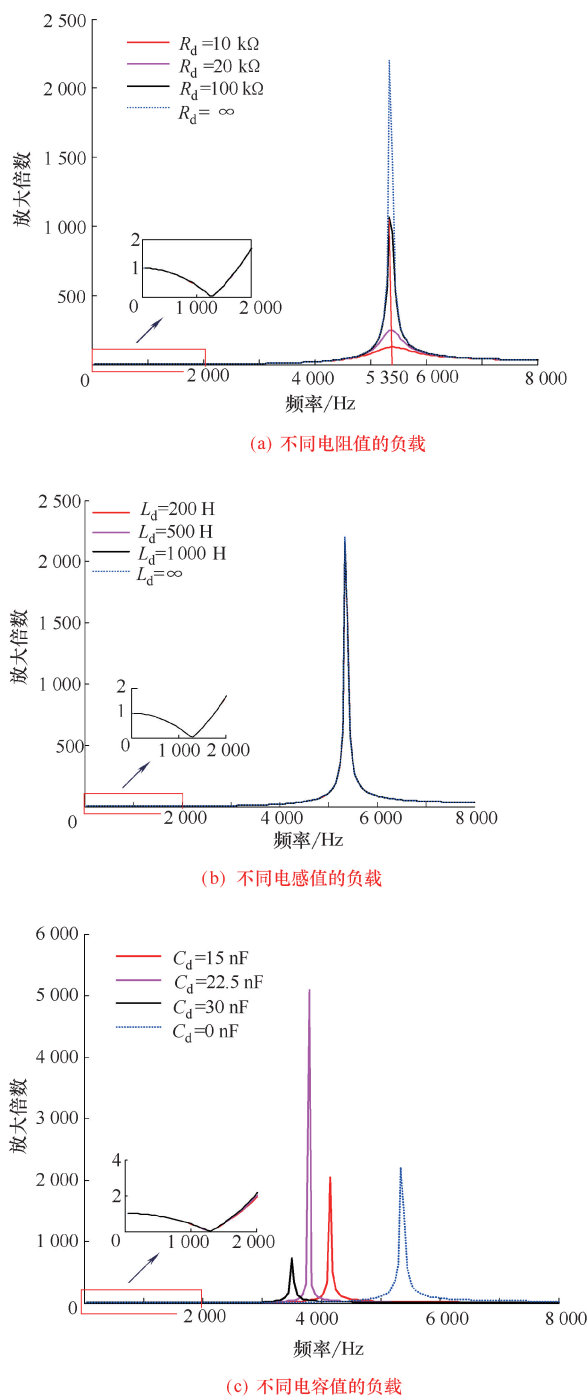


图6 不同负载性质下的电压传递特性曲线

Fig. 6 Voltage transfer characteristic curves with different loads

表 2 不同负载参数值

Tab. 2 Different load parameter value

电阻/k Ω	电感/H	电容/nF
10	200	15
20	500	22.5
100	1 000	30

从图 6 中可以看出,不同电感值的负载及不同电阻值的负载对变压器电压传递曲线几乎无影响,极点谐振频率均不发生改变;但是电阻数值的改变会影响极点通频带的带宽,电阻数值变大,通频带带宽变窄,电压传递曲线变尖锐;不同电容值的负载会改变极点谐振频率,电容数值越大,极点谐振频率越小;当负载电容值等于二次绕组电容值与一次绕组间的电容值时(在本文中为 22.5 nF),放大倍数达到带电容负载时的最大值。

3.3 功率因数对电压传递函数的影响

电力系统结构十分复杂,实际负载往往无法用纯性质负载等效,因此,有必要研究变压器后接不同功率因数负载时电压传递特性的变化情况。为此,本文分别研究了额定功率下功率因数 $\cos \varphi$ 为 0.3、0.5、0.8 和 1 时的电压传输特性。负载参数值如表 3 所示,其中电阻与电容或电阻与电感采用并联连接方式。

表 3 负载参数值

Tab. 3 Load parameter value

$\cos \varphi$	滞后功率因数		超前功率因数	
	$R_d/k\Omega$	L_d/H	$R_d/k\Omega$	C_d/nF
0.3	100	1 012.20	100	10.01
0.5	100	551.33	100	18.37
0.8	100	238.72	100	42.44
1	100	0	100	0

变压器传递额定功率时,不同功率因数负载下的电压传递特性曲线如图 7 所示。其中图 7a、b 分别为超前功率因数(带阻容负载)情况和滞后功率因数(带阻感负载)情况。可以看到:

1) 在超前功率因数负载情况下,电阻不变,随着功率因数的增加,负载电容逐渐增

加,极点谐振频率向更低频段移动。放大倍数的极大值随着负载电容的增加逐渐减小,但依旧属于较大值。

2) 在滞后功率因数负载情况下,电阻不变,随着功率因数的增加,负载电感逐渐减小,电压传递特性曲线几乎不发生改变,但电压传输比相较于基波时有所放大,说明传输到二次侧的谐波电压增加。

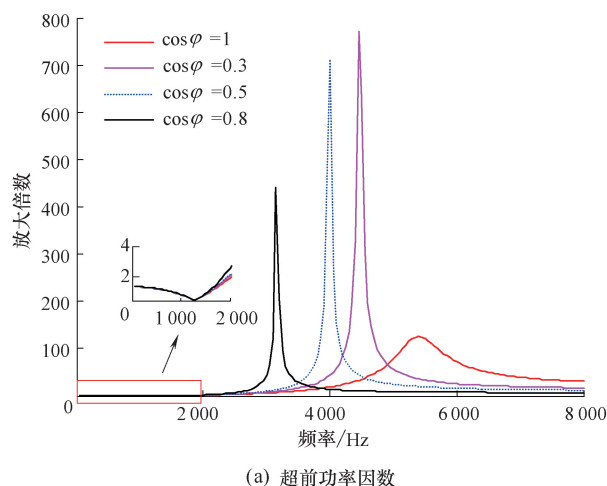
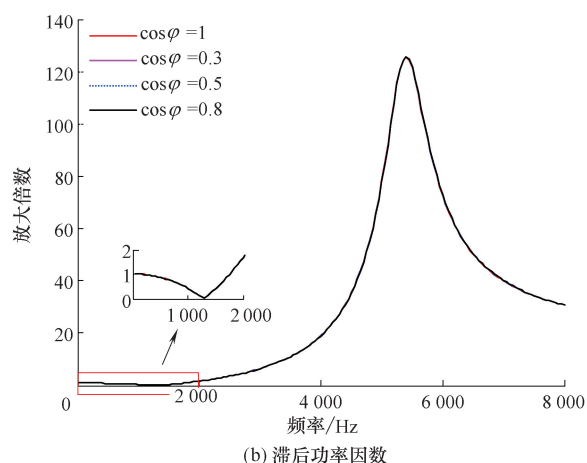


图 7 不同功率因数下的电压传递特性曲线

Fig. 7 Voltage transfer characteristic curves with different power factors

4 结束语

本文在变压器谐波等效电路模型基础上,理论推导了变压器超高次谐波传递函数,分析

了变压器超高次谐波传递特性与负载性质之间的关联关系；揭示了寄生参数对变压器电压传递特性的影响作用。本文主要结论归纳为：

1) 由于寄生电容的存在，变压器内部存在两个谐振频率：极点谐振频率和零点谐振频率。零点谐振频率处，电压传输比接近 0；极点谐振频率处，二次电压显著放大。

2) 基波情况下，电压传输比为二次绕组与一次绕组匝数比，随着频率的增加，除在零点谐振频率处外，二次电压整体呈放大趋势。

3) 阻性负载和感性负载对变压器谐振频率影响不大，但阻性负载会影响通频带的带宽；容性负载使得通频带向频率更低处移动。EA

参考文献

- [1] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (34): 9-16, 20.
- [2] 唐开宇, 尹军, 王海燕, 等. PWM 整流型电动汽车充电机的谐波与超高次谐波分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39 (3): 39-44.
- [3] 赵元哲, 李群湛, 周福林, 等. 牵引网高次谐波对高低压三相系统的渗透特性 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50 (5): 961-969.
- [4] 刘森, 黄毕尧, 王聪, 等. 超级谐波研究综述 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (12): 7-15.
- [5] 肖湘宁, 廖坤玉, 唐松浩, 等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (4): 707-720.
- [6] 汪颖, 罗代军, 肖先勇, 等. 超高次谐波问题及其研究现状与趋势 [J]. 电网技术, 2018, 2 (2): 353-365.
- [7] AYACHIT A, KAZIMIERZUK M K. Transfer functions of a transformer at different values of coupling coefficient [J]. IET Transactions on Circuits, Devices & Systems, 2016, 10 (4):

337-348.

- [8] 贾静然, 段晓波, 卢锦玲, 等. 变压器的谐波传递特性研究 [J]. 中国电力, 2017, 50 (1): 92-96, 157.
- [9] 朱永强, 郝嘉诚, 唐冀, 等. 大型光伏电站集电系统谐波传递网络分析 [J]. 电力建设, 2016, 37 (10): 122-129.
- [10] CLAUDIO Y, INABA, et al. High frequency transformer-assisted passive soft switching PWM DC-DC converter with energy recovery for compact auxiliary power supply in rolling stock transportation [C]. IEEE IAS, Salt Lake City, Utah, USA, 2003.
- [11] 董纪清, 陈为, 卢增艺. 开关电源高频变压器电容效应建模与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (31): 121-126.
- [12] UYTTERHOEVEN S. Measuring transformer characteristics and determining equivalent circuit [R]. Linkebeek: Laborelec, 2008

作者简介



段锐敏

段锐敏 (1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量监测、分析与控制。

(收稿日期: 2021-04-08)