

电压互感器中非整数次谐波电压研究

陈铭明, 杨世海, 吴 鹏, 卢树峰

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要: 电弧炉在冶炼过程中产生大量的非整数次谐波, 其引起的电压波动频率成分主要分布在处于人类视觉敏感区域的 4~14 Hz 频带。串联电压补偿器是一种串联补偿装置, 其良好的动态性能使其成为抑制非整数次谐波的有效手段。本文介绍了非整数次谐波引起的电压波动特性, 电弧炉的组成结构、工作原理以及其产生的非整数次谐波, 串联电压补偿器的功能、构成及其特点, 建立了串联电压补偿器模型, 通过仿真, 验证了串联电压补偿器对非整数次谐波引起的电压波动和闪变的抑制作用。

关键词: 电压互感器; 非整数次谐波; 串联电压补偿器; 电压波动

0 引言

随着非线性负荷的广泛应用, 电力系统中出现越来越严重的电能质量问题^[1]。非线性负荷的非线性特性产生了电压波动、闪变、三相不平衡问题, 其中电压波动与闪变问题成为影响电能质量的主要问题^[2]。电弧炉是一种高度时变性负载, 它会产生大量的非整数次谐波从而引起电网电压剧烈波动。非整数次谐波^[3], 为非基波频率整数倍的谐波分量。当实际电压波形含有非整数次谐波成分时, 由于非整数次谐波的周期与基波分量的周期不是同步的, 电压波形的有效值和峰值会出现波动, 不再是一个定值。当波动幅度较大并且该波动频率在人眼的觉察频率范围之内时, 人眼就会感觉到白炽灯的闪变现象。电压波动频率主要分布在 0~50 Hz 频带上, 其中在 8 Hz 频率左右的成分对仪器和生活生产带来很大的危害: ①照明灯光闪烁, 引起人的视觉不适合疲劳, 进而影响视力; ②电视机画面亮度变化, 图像垂直或水平摆动, 刺激人的眼睛和大脑; ③电动机转速不均匀, 影响电机寿命和产品质量; ④电子仪器、电子计算机、自动控制设备等工作不正常等^[4]。国标《电热设备电力装置设计规范》规定“电弧炉工作短路引起供电母线的电压波动值不超过 2.5%”。

串联电压补偿器^{[5][6]}具有补偿电压与供电回路阻抗无关、设备容量小、动态响应快等特点。其良好的动态性能和容量上的相对优势使其成为目前治理动态电压问题与闪变问题中最经济、有效的手段之一。文献^[11]提出了采用小波变换和同相位补偿的不间断动态电压恢复器。

本文首先分析了电压互感器中非整数次谐波引起的电压波动特性, 然后具体分析了串联电压补偿器的结构、功能和控制算法, 最后对电弧炉模型和串联电压补偿器模型进行了仿真, 用串联电压补偿器来抑制电弧炉产生间谐波, 结果显示串联电压补偿器能很好的抑制非整数次谐波引起的电压波动和闪变问题。

1 含非整数次谐波的电压波动特性分析

当基波信号上叠加非整数次谐波时, 由于非整数次谐波与基波不同步, 导致合成的信号呈现波动状态, 引起荧光灯闪变。含一个非整数次谐波的电压信号可以表示为:

$$v(t) = V(\sin(2\pi f_1 t) + m \sin(2\pi f_{ih} t + \theta)) \quad (1)$$

其中 V 表示基波幅值;

f_1 表示基波频率;

m 表示非整数次谐波相对幅值;

f_{ih} 表示非整数次谐波频率;

θ 表示非整数次谐波的初始相位。

令 $f_{ih} = hf_1 + \Delta f$, 其中 h 为非整数次谐波频率临近的谐波次数, 并且近似认为当 $t = n/(4f_1), (n=1, 3, 5, \dots)$ 信号系统电压达到极值,

$$v_{peak} = V(1 + m \sin(\frac{n\pi\Delta f}{2f_1} + \frac{nh\pi}{2})) \approx V(1 \pm m) \quad (2)$$

则峰值电压波动为

$$d_{max} = \frac{\Delta v}{V} = \frac{v_{max} - v_{min}}{V} = 2m \quad (3)$$

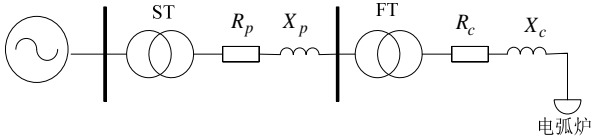
所以对于含有非整数次谐波的电压来说, 峰值电压波动取决于信号电压所含非整数次谐波的大小, 而非整数次谐波的频率无关。

2 电弧炉的工作机理及电压波动研究

一个典型的电弧炉供电系统^[12]如图1(a)所示。

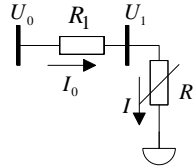
ST为配电变压器， R_p 和 X_p 为配电变压器至电弧炉变压器FT之间传输线的电阻和电抗， R_c 和 X_c 是电弧炉变压器至电弧炉间的短网电阻和电抗。

为了分析电弧炉运行时产生的非整数次谐波情况，现简化其系统图，如图1(b)。 R_l 为电弧炉供电回路总电阻(包括供电系统、电弧变压器、电炉短网电阻)， R 为电弧电阻。 U_1 为系统侧电压， U_0 为电弧炉变压器侧的电压，为了保证电弧炉的工作效率，此电压一般保持不变。这里为了分析非整数次谐波的产生，忽略电抗，电弧炉的电阻为变化的，而且冶炼周期很长，在运行过程中，特别是在熔化初期(起弧、穿井、塌料阶段)变化剧烈，下面来分析此阶段产生的非整数次谐波情况。



(a) 电弧炉的供电系统图

(a) Power supply system of the electric arc furnace



(b) 简化电路图

(b) Simplified circuit diagram

图1 电弧炉系统原理图

Fig.1 Schematic of the arc furnace system

令电弧炉电阻的波动情况如下：

$$R=1-r\sin(2\pi f_m t) \quad (4)$$

则线路中电流：

$$\begin{aligned} i_0(t) = i(t) &= \frac{v(t)}{R(t)} = \frac{U_1 \sin(2\pi f_1 t)}{1-r\sin(2\pi f_m t)} \\ &= U_1 \sin(2\pi f_1 t) \left[1 + r \sin(2\pi f_m t) + r^2 \sin^2(2\pi f_m t) + L \right] \end{aligned} \quad (5)$$

系统侧电压：

$$u_0 = u_1 + i_0(t) \cdot R_l$$

$$= u_1 + U_1 R_l \sin(2\pi f_1 t) \left[1 + r \sin(2\pi f_m t) + r^2 \sin^2(2\pi f_m t) + L \right] \quad (6)$$

由此可得到系统侧电压中将含有各种频率的非整数次谐波，从而引起系统侧电压波动^[13]和闪变。

3 串联电压补偿器的工作原理与结构

串联电压补偿器是一种串联在电网和负载之间通过向系统注入标准电压和系统电压的差值来补偿系统电压的波动的电力电子装置，它相当于一个可以快速调节的电压源，通过快速补偿特性为负载提供稳定正弦电压，从而通过抑制电压波动来抑制非整数次谐波。串联电压补偿器装置由五部分组成：检测单元、控制单元、逆变单元、储能单元、滤波单元，如图2所示。

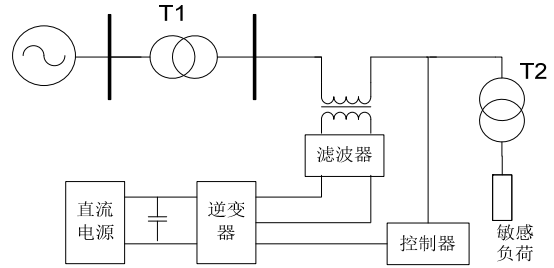


图2 串联电压补偿器结构原理图

Fig.2 Principle of the Series voltage compensator

串联电压补偿器通过检测电源电压的基波分量，然后和母线电压比较得到电压差，通过控制单元运算得到指令信号，对逆变器进行控制，产生需要的补偿电压；再经过滤波电路和变压器，叠加到负载电路中，从而确保负载电压的质量。

检测单元：根据电力系统电流、电压的特点，用傅里叶级数展开即为：

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{k=1}^M [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \\ &= \sum_{k=1}^M A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$, $\varphi_k = \arctan(a_k / b_k)$ 。

对上式两边求导可得到：

$$f'(t) = \sum_{k=1}^M A_k k \omega \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (8)$$

$$g(t) = f'(t) / \omega = \sum_{k=1}^M A_k k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (9)$$

则可以构成二维空间中的一个点 $[f(t), g(t)]$, 可以看成是二维空间中原点为圆心, 终点为 $[f(t), g(t)]$ 的向量 F 。现定义二维空间中另外两个向量, 即向量 $F_1 = (\sin \omega t, \cos \omega t)$ 与向量 $F_2 = (\sin(\omega t + \pi/2), \cos(\omega t + \pi/2)) = (\cos \omega t, -\sin \omega t)$ 。由于 ω 是已知的, 所以上述两个向量可以自己构造得到, 利用向量的点积, 可以得到:

$$\begin{aligned} F \cdot F_1 &= f(t) \sin \omega t + g(t) \cos \omega t \\ &= A_1 \cos \varphi_1 + \sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k) \sin \omega t + k \cos(k\omega t + \varphi_k) \cos \omega t] \\ &= A_1 \cos \varphi_1 + \tilde{P}_1 \\ &= P_1 + \tilde{P}_1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F \cdot F_2 &= f(t) \cos \omega t - g(t) \sin \omega t \\ &= A_1 \cos \varphi_1 + \sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k) \cos \omega t + k \cos(k\omega t + \varphi_k) \sin \omega t] \\ &= A_1 \sin \varphi_1 + \tilde{P}_2 \\ &= P_2 + \tilde{P}_2 \end{aligned} \quad (11)$$

由上面两式可见, 向量 F 与 F_1 和 F_2 的点积中均含有直流分量与谐波分量。如果对点积结果进行低通滤波, 即可得到 P_1 和 P_2 , 因此可以得到信号 $f(t)$ 的基波分量, 即

$$f_f(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \sin[\omega t + \arctan(P_2 / P_1)] \quad (12)$$

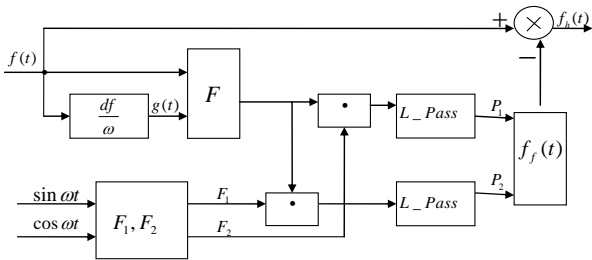


图3 单相谐波快速检测方法框图

Fig.3 Rapid detection method for single-phase harmonic

控制单元: 本论文采用了前馈控制方法, 该方法具有较快的响应速度, 控制方法简单。其控制过程为: 检测后的基波分量电压减去系统电压, 得到参考补偿电压, 然后用 SPWM 方式产生逆变电路的驱动脉冲, 逆变器向系统注入补偿电压, 其框图如图4所示。

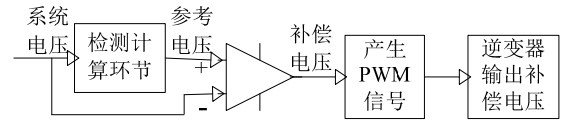


图4 串联电压补偿器控制原理框图

Fig.4 Principle of series voltage compensator

逆变单元: 逆变器为串联电压补偿器的核心单元, 它是基于全控器件的电压源型 PWM 逆变器, 通过逆变器对直流电压的逆变产生用于补偿系统电压波动的串联交流电压。

对于单相电压波动, 一般采用单相全桥逆变电路; 若为三相电压波动, 可以采用三单相结构, 这样可以防止三相电压不平衡的情况。

滤波单元: 如图5所示, 由于补偿电压波动的补偿电压为低频, 主要集中在 50 Hz 一带, 因此滤波器设计为低通滤波, 滤除逆变器开关通断所产生的高次谐波。

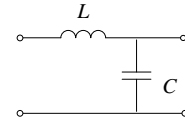


图5 滤波系统
fig.5 Filter system

4 仿真系统

通过拟合电弧炉系统侧电压曲线, 电阻时变性引起的 8Hz 电压闪变成为电弧炉对系统的最大危害。本论文通过对典型的电弧炉系统侧电压进行分析, 基波电压频率为 50 Hz, 幅值为 100 V, 非整数次谐波的电压频率为 8 Hz, 幅值为 10 V, 则电压函数为

$$f(x) = 100 \sin(2\pi \times 50t) + 10 \sin(2\pi \times 8t) \quad (13)$$

曲线如图6。

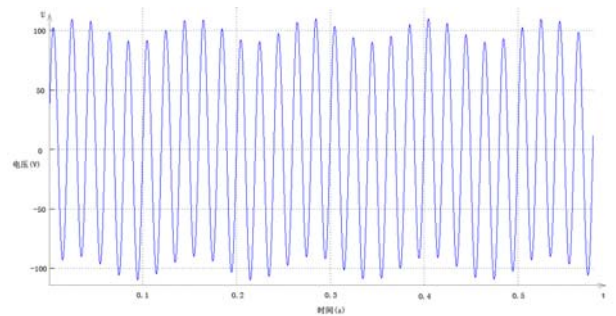


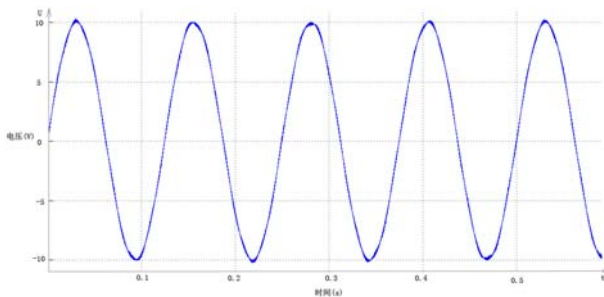
图6 原始电压波形图

Fig.6 Original waveform

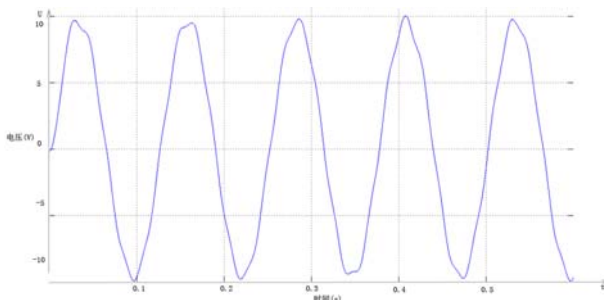
最大电压波动:

$$d_{\max} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u} \times 100\% = \frac{110 - 90}{100} \times 100\% = 20\% \quad (14)$$

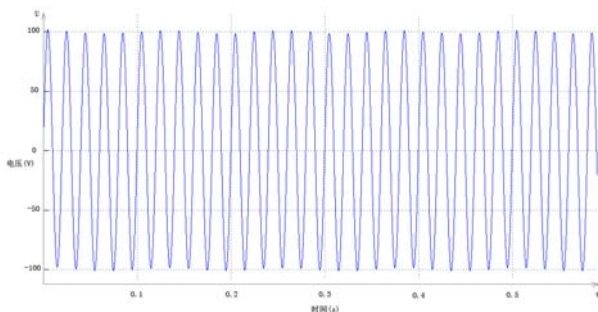
在 matlab 的 SIMULINK 环境下搭建仿真模型, 在线路中串入串联电压补偿器, 原理图如图 (2) 所示。通过检测系统分析计算后得到的原始电压的基波电压图如图 7(a)所示; 由于采用开环控制, 逆变器输出的电压受 50 Hz 的基波的干扰, 因此包含一定频率的基波电压, 如图 7(b)为逆变器输出的补偿电压波形; 图 7(c)为补偿后的电压波形。



(a) 检测的基波电压波形图
(a) Voltage waveform of 50 Hz



(b) 补偿电压波形图
(b) Voltage waveform of compensation



(c) 补偿后的系统电压图
(c) System voltage waveform after compensation
图7 系统仿真波形图

fig.7 Voltage waveform of system simulation

投入串联电压补偿器之后, 经 FFT 分析电压波形中存在 50 Hz 的基波和 8 Hz 的非整数次谐波, 但

8Hz 的非整数次谐波从 10 V 降到了 1.2 V, 则电压的最大波动为:

$$d_{\max} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u} \times 100\% = \frac{101.2 - 98.8}{100} \times 100\% = 2.4\% \quad (15)$$

因此采用串联补偿的方式则很好的抑制了非整数次谐波, 降低了电压波动, 并且达到了国家标准, 抑制了闪变。

5 结论

随着电力工业负荷的不断发展,越来越多的电弧炉用户负荷进入供电系统。由于其非线性冲击负荷,电弧炉对电网的影响最严重的是产生非整数次谐波, 从而引起电压波动和闪变,严重危害供电质量, 危害用户电器的用电安全和人身健康。

为此, 本文针对电弧炉负荷产生的非整数次谐波以及非整数次谐波引起的电压波动和闪变特性, 对串联补偿进行了系统研究。研究证明采用串联电压补偿的方法可以很有效地抑制电弧炉产生的非整数次谐波, 从而抑制电压波动和闪变。

参考文献:

- [1] 崔健. 电弧炉负荷对电网的危害及治理办法[J]. 中国电力教育, 2007(S3研究综述与技术论坛专刊): 51-53.
- [2] 刘轩. 交流电弧炉对电压波动和闪变的影响[J]. 冶金动力, 2007(1): 6-9.
- [3] 周海兵, 雍静. 间谐波电压作用下荧光灯的闪变研究[J]. 低压电器, 2009(2): 38-41.
- [4] 王育飞, 李东东, 贾宏新. 闪变仿真法在电弧炉供电系统中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2317-2321.
- [5] 韩民晓, 尤勇, 刘昊. 线电压补偿型动态电压调节器DVR的原理与实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 49-53.
- [6] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
- [7] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
- [8] 张允, 胡晓磊, 邹云屏. 动态电压恢复器的负载电流直接控制策略. 电力电子技术, 2009, 43(5): 5-6.
- [9] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 态电压恢复器双闭环控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(6): 34-36.
- [10] 毕向阳, 朱凌. 无源滤波器的设计及仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 22-25.
- [11] 任永峰, 安中全, 赵喜. 采用小波变换和同相位补偿的间断动态电压恢复器[J]. 高电压技术, 2010, 36(3):

757-762.

[12] 王育飞,潘艳霞,姜建国. 基于MATLAB的交流电弧炉随机模型与仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 973-977.

[13] 郭晓丽, 刘建兰, 吴晓. 电压波动信号检测方法的仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2): 41-44.

杨世海(1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能计量技术和计量管理;

吴 鹏(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为变压器检测技术;

卢树峰(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统和电能计量管理。

作者简介:

陈铭明(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与电能计量, E-mail: rd1228@163.com;

Analysis of Inter-harmonic Voltage in the Potential Transformer

CHEN Mingming, YANG Shihai, WU Peng, LU Shufeng

(JiangSu Electric Power Company Research Institute, NanJing 211103)

ABSTRACT: Electric arc furnace produces a great quantity of inter-harmonics, causing voltage fluctuations mainly distributed in the sensitive areas of human visual 4~14 Hz band in the smelting process. Series voltage compensator is a series compensation device and good dynamic performance making it an effective means to suppress inter-harmonics. The article describes voltage fluctuation characteristics caused by inter-harmonics, the structure of the electric arc furnace, the composition and function of series voltage compensator. By modeling and simulation, series voltage compensator is proved effective to suppress voltage fluctuation and flicker caused by inter-harmonics.

KEY WORDS: potential transformer; inter-harmonic; series voltage compensator; voltage fluctuation