

基于串联补偿的间谐波抑制技术研究

杨志新, 杨世海

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 随着非线性负荷的增多和电力电子技术在电网中的广泛应用, 近年来电网中出现大量的谐波和频谱分散的间谐波。间谐波除了具有谐波的危害之外, 还造成其他严重危害, 如引起电压波动和闪变等。目前国内对间谐波的研究还在性质分析和检测算法阶段, 还没有可靠有效的抑制措施。文中提出一种基于串联补偿的间谐波抑制技术, 并对电弧炉产生的电压波动和闪变抑制情况进行仿真分析, 证明其成为抑制间谐波的有效手段。首先介绍间谐波引起的电压波动特性, 然后介绍串联补偿原理及构成, 最后在 SIMULINK 环境下建立串联电压补偿器模型和电弧炉模型, 通过仿真验证串联电压补偿器对间谐波的抑制作用。

关键词: 串联补偿; 间谐波; 电弧炉; 电能质量

中图分类号: TM711

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0038-05

间谐波是指一个周期电气量的正弦波分量, 其频率为基波频率的非整数次倍, 也就是说间谐波电压的频率介于工频和谐波频率之间, 它们可能是离散的频率, 也可能以连续频带的形式出现。当实际电压波形含有间谐波成分时, 由于间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, 而不再是一个定值。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^[1-3]。

电弧炉作为电网典型的冲击性、非线性电力负载向配电网中注入大量间谐波从而引起电网电压剧烈波动。本文通过对电弧炉模型的研究, 得到电弧炉工作的典型波形, 从而研究对间谐波的抑制措施。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%”。串联电压补偿器具有设备容量小、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。当系统电压发生电压波动时, 串联电压补偿器的检测单元通过计算出基波分量, 然后与系统电压比较得到电压差, 送到控制单元, 经运算得到 PWM 脉冲控制逆变单元, 使其输出电压来补偿电压差, 达到抑制电压波动的效果^[4,5]。

1 间谐波特性分析

当基波信号上叠加间谐波时, 由于间谐波与基波频率不同步, 导致合成的信号呈现波动状态, 从而引起荧光灯闪变。含一个间谐波的电压信号为:

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

式(1)中: V 为基波幅值; f_1 为基波频率; m 为间谐波相对幅值; f_{ih} 为间谐波频率; θ 为间谐波的初始相位。

令 $f_{ih} = hf_1 + \Delta f$, 其中 h 为间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:

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

所以对于含有间谐波的电压来说, 峰值电压波动取决于电压所含间谐波的大小, 而与间谐波的频率无关。

2 串联补偿原理与结构

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间谐波^[6,7]。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 1 所示。

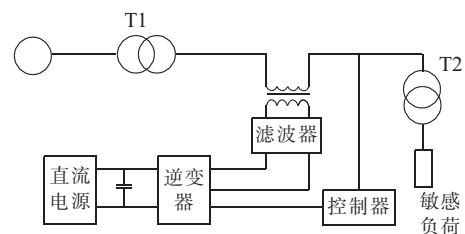


图 1 串联电压补偿器结构原理图

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。

2.1 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:

$$f(t) = \sum_{k=1}^M [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] = \sum_{k=1}^M A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (4)$$

式(4)中: $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$; $\varphi_k = \arctan(a_k/b_k)$ 。

对式(4)两边求导可得:

$$f'(t) = \sum_{k=1}^M A_k k\omega \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (5)$$

$$g(t) = f'(t)/\omega = \sum_{k=1}^M A_k k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (6)$$

构成二维空间中的一个点 $[f(t), g(t)]$, 以二维空间中原点为圆心, 终点为 $[f(t), g(t)]$ 的向量 F 。现定义另外 2 个向量, 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 2 个向量可以自己构造得到, 利用向量的点积, 可以得到:

$$\begin{aligned} F \cdot F_1 &= f(t)\sin\omega t + g(t)\cos\omega t = A_1 \cos\varphi_1 + \\ &\sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k)\sin\omega t + k\cos(k\omega t + \varphi_k)\cos\omega t] = \\ &A_1 \cos\varphi_1 + \tilde{P}_1 = P_1 + \tilde{P}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F \cdot F_2 &= f(t)\cos\omega t - g(t)\sin\omega t = A_1 \cos\varphi_1 + \\ &\sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k)\cos\omega t + k\cos(k\omega t + \varphi_k)\sin\omega t] = \\ &A_1 \cos\varphi_1 + \tilde{P}_2 = P_2 + \tilde{P}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

由上面式(7)、式(8)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 , 如图 2 所示。因此可以得到信号 $f(t)$ 的基波分量, 即:

$$f_f(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \sin[\omega t + \arctan(P_2/P_1)] \quad (9)$$

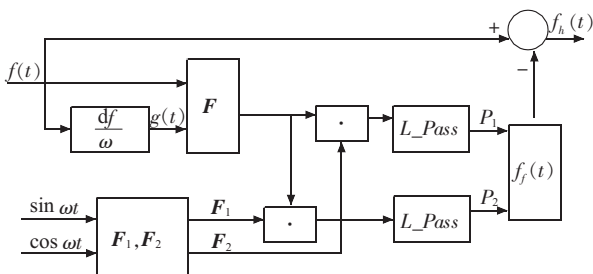


图 2 单相谐波快速检测方法框图

2.2 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。为了研究串联电压补偿器的控制模型, 首先分析其数学模型, 从而得到控制的传递函数。这里采用三单相逆变器的单相系统进行分析, 单相逆变器模块功率部分的等效电路如图 3 所示。

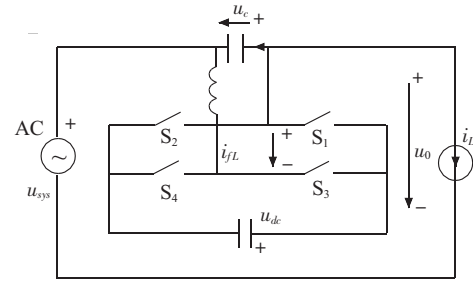


图 3 单相串联逆变器功率电路

图 3 中, u_{sys} 为系统侧电压; u_c 为补偿电压; u_0 为用户侧电压; u_i 为逆变器输出电压; u_{dc} 为直流侧电压; i_{fc} 为滤波电容电流; i_{fL} 为滤波电感电流; i_L 为负载电流; L 为滤波电感; C 为滤波电容。

根据图 3 写出系统的状态方程:

$$i_L = i_{fL} - i_{fc} = i_{fL} - C \frac{du_c}{dt} \quad (10)$$

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + u_i = u_0 \quad (11)$$

逆变器的输出电压为直流侧电压的开关函数, 即:

$$u_i = S^* u_{dc} \quad (12)$$

假定逆变器开关只有 2 种状态, 即 $S_1 S_4$ 开通而 $S_2 S_3$ 关断, 或 $S_1 S_4$ 关断而 $S_2 S_3$ 开通, 则开关函数 S^* 与逆变器开关的开通和关断有如下关系, 即: $S^* = 1$, 表示 $S_1 S_4$ 开通; $S^* = -1$, 表示 $S_2 S_3$ 开通。

将式(12)代入式(11)中可得:

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + S^* u_{dc} = u_0 \quad (13)$$

由式(13)可知, 式(13)表示的是不同取值情况下的 2 个状态方程, 当开关频率远远高于被调制的基波频率时, 可以采用一个开关周期内状态平均的方法, 用一个开关周期内两个状态持续时间的平均值取代 S^* , 记为 $\overline{S^*}$, 则状态方程可以改成下式, 即:

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + \overline{S^*} u_{dc} = u_0 \quad (14)$$

根据规则采样条件下 PWM 开关信号产生原理, 得:

$$\overline{S^*} = m \sin \omega_r t_d \quad (15)$$

则逆变器的输出电压可以写成:

$$u_i = m \sin \omega_r \cdot u_{dc} \quad (16)$$

因此,单相串联逆变器的状态方程为:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_{fL} - i_L) \quad (17)$$

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{L} [u_{sys} + m \sin(\omega_r t_d) u_{dc} - u_0]$$

将逆变器等效为一个增益 $k_m = u_{dc}$ 的线性环节,因此可以用 $u_i = k_m u_r$ 表示逆变器的输出和调制波的关系。根据单相串联逆变器的状态方程式,得到用传递函数表示的系统状态空间的模型框图,如图4所示。

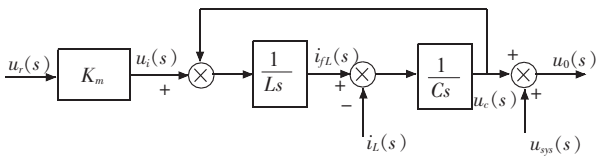


图4 系统传递函数模型

2.3 控制单元

2.3.1 前馈控制

前馈控制具有较快的响应速度,控制方法简单,因此在很多场合都采用这种控制方式。它的控制过程为通过对系统电压进行基波检测,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5所示。

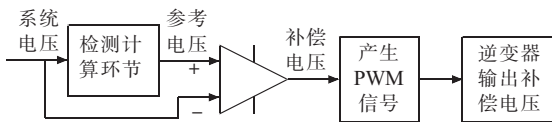


图5 串联电压补偿器控制原理框图

利用图5所示的传递函数框图,可以得到在这种控制方式下的传递函数:

$$u_0(s) = \frac{K_m}{1+LCs} u_r(s) + u_{sys}(s) - \frac{1}{1+LCs} i_L(s) \quad (18)$$

由式(18)可知,负荷侧输出电压 u_0 不仅仅与电压基准信号有关,还与滤波参数、负载电流以及系统侧输入电压有关。

2.3.2 输出电压反馈控制

为了获得更好的负载调节特性和稳定的输出电压,可以对输出电压进行直接控制。输出电压有效值反馈控制可以稳定输出电压有效值,但会使补偿器的响应速度变慢,导致补偿器的响应时间在一到几个周波以上,因此一旦系统电压发生动态跌落,补偿器将来不及快速补偿,从而影响敏感负荷工作。输出电压瞬时电压控制可以调节参考电压和输出电压瞬时值之差,因此可以大大提高输出电压的响应速度与动态性能^[8,9]。但仅仅采用电压瞬时控制的方式对于非线性负载的适

应性并不是很好,同时系统的稳定裕度不高,参数设计比较困难。为了减小负载电流的影响,这里引入具有电流瞬时值反馈的控制方法,采用电压瞬时值作为外环控制,确保负荷电压侧电压能够快速跟随参考电压,保证装置具有良好的响应速度;而将电流局部反馈控制作为内环控制,以提高补偿器对参数及负载的独立性,确保在各种负载工况下装置的稳定运行,如图6所示。

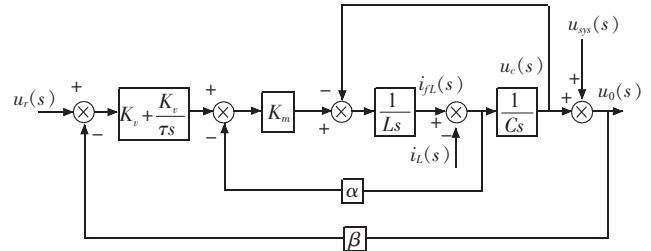


图6 双闭环控制系统框图

输出电压 u_0 和参考电压 u_r 之间的开环传递函数、闭环函数分别为:

$$G_{or}(s) = \frac{\beta K_m K_v (1 + \tau s)}{\tau s (LCs^2 + K_m C\alpha s + 1)} \quad (19)$$

$$G_{cr}(s) = \frac{K_m K_v \tau s + K_m K_v}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (20)$$

选择合适的参数从波特图可以看出系统具有较好的稳定裕度,并且在低频时输出电压可以跟踪参考电压,具有良好的低频特性。

负载电流 i_L 和输出电压 u_0 的传递函数:

$$G_{ci}(s) = \frac{-L\tau s^2}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (21)$$

$G_{ci}(s)$ 反映了输出电压受负载电流影响的情况。在装置损耗及器件开关频率允许情况下,选择高一些的开关频率有利于提高补偿器对负载的适应能力。

输出电压 u_0 与系统电压 u_{sys} 的闭环传递函数:

$$G_{c_{sys}}(s) = \frac{\tau s (LCs^2 + K_m C\alpha s + 1)}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (22)$$

从系统的单位阶跃响应可以看出,输出电压对于系统电压的阶跃变化具有很好的稳态响应,静态误差趋向于0。

2.4 滤波单元

如图7所示。为了使负荷输出侧输出电压中含有较低的谐波分量,首先要防止逆变器开关动作时的特征谐波叠加到负荷侧,同时也要防止特征谐波干扰系统电压,所以通常将滤波器的截止频率设计在远小于逆变器开关频率处,目的是消除特征谐波,即:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < \frac{f_{sw}}{K} \quad (23)$$

式(23)中: f_{sw} 为逆变器开关频率; K 为根据实际情况选取(通常 $K>10$)。

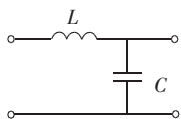


图7 滤波系统

滤波器参数设计步骤:(1)确定开关频率;(2)确定滤波器截止频率;(3)根据负载电流的大小确定滤波电感参数;(4)根据截止频率确定滤波电容参数^[10]。

3 仿真系统

一个典型的电弧炉供电系统如图8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电阻和电抗。电弧炉的电阻为变化的属于非线性负荷,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,系统侧电压中将含有各种频率的间谐波,从而引起系统侧电压波动和闪变^[11]。

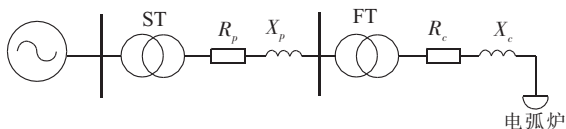


图8 电弧炉系统原理图

通过拟合电弧炉系统侧电压曲线,电阻时变性引起的8 Hz左右的电压闪变成为电弧炉对系统的最大危害,一个典型的电压曲线拟合图如图9所示。

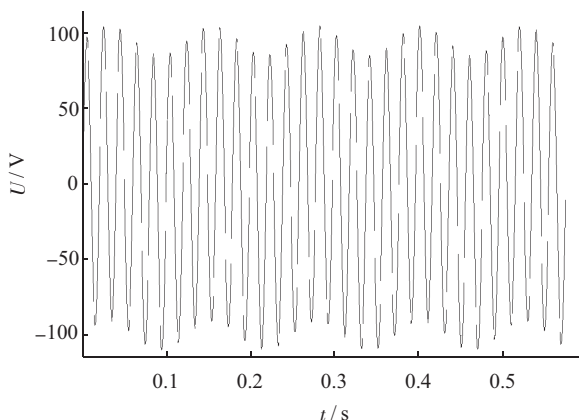


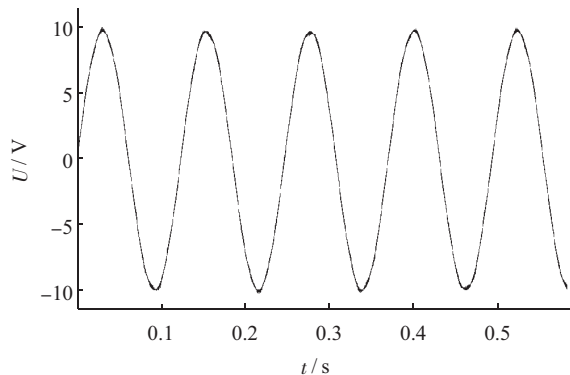
图9 原始电压波形图

经FFT分析,基波电压幅值100 V,频率为50 Hz,间谐波电压幅值10 V,频率为8 Hz,则最大电压波动:

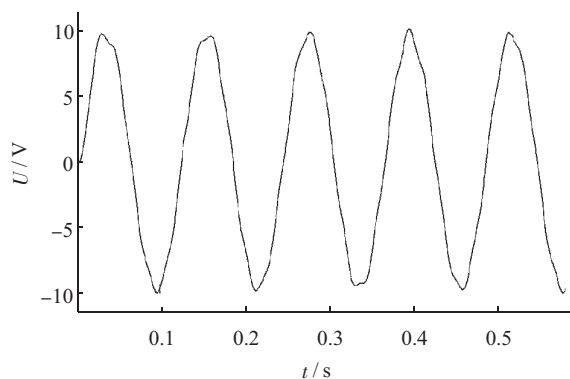
$$d_{\max} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u} \times 100\% = \frac{110 - 90}{100} \times 100\% = 20\%$$

在SIMULINK环境下搭建仿真模型,在线路中串入串联电压补偿器。通过检测系统分析计算后得到原

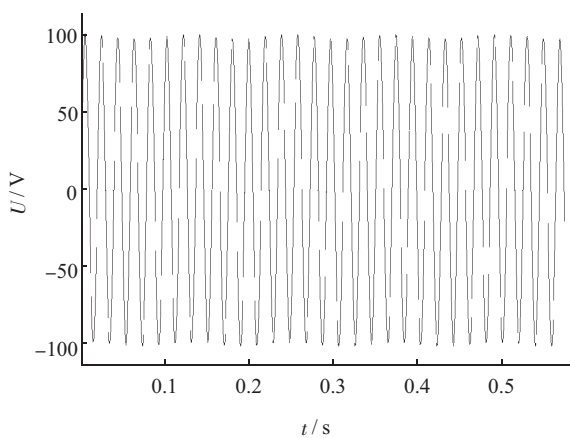
始电压的基波电压图如图10(a)所示。由于采用开环控制,逆变器输出的电压受50 Hz的基波的干扰,因此包含一定频率的基波电压。逆变器输出的补偿电压波形图如图10(b)所示;补偿后的电压波形图如图10(c)所示。



(a) 检测的基波电压波形图



(b) 补偿电压波形图



(c) 补偿后的系统电压图

图10 系统仿真波形图

投入串联电压补偿器之后,经FFT分析电压波形中存在50 Hz基波和8 Hz间谐波,但8 Hz的间谐波从10 V降到了1.2 V,则电压的最大波动为:

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

因此采用串联补偿的方式则很好抑制了间谐波,降低了电压波动,并达到国家标准,抑制了闪变。

4 结束语

(1) 基于间谐波的电压特性分析, 当基波电压叠加间谐波电压时, 电压呈现波动状态, 且引起荧光灯闪变, 峰值电压波动取决于间谐波电压大小, 与间谐波频率无关。

(2) 串联电压补偿装置控制单元引入前馈控制和输出电压反馈控制方法, 通过计算分析表明, 电压反馈作外环控制、电流反馈作内环控制的控制方法具有良好的响应速度和稳定性。

(3) 根据电弧炉与串联补偿装置仿真模拟, 将电压波动值从 20% 降到 2.4%, 有效地抑制了电弧炉产生的电压波动和闪变。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 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.
- [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] 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.

- [5] 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[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 5-6.
- [6] 任永峰, 安中全, 赵 喜. 采用小波变换和同相位补偿的不间断动态电压恢复器[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 757-762.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 动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. 无源滤波器设计及仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 22-25.
- [11] 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.

作者简介:

杨志新(1968), 男, 江苏溧阳人, 高级工程师, 从事计量管理和研究工作;
杨世海(1976), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 从事计量管理和研究工作。

Research of Inter-harmonics Suppression Technology Based on Series Compensation

YANG Zhi-xin, YANG Shi-hai

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the increase of non-linear loads and widely usage of power electronic technology in power grid, there have been a large number of harmonics and spread spectrum inter-harmonics in the grid recently. Inter-harmonics have caused more serious hazards than harmonics, such as voltage fluctuation and flicker. Studies of inter-harmonic are still at the stage of characteristic analysis and detective algorithm, without reliable and effective suppression method. This article presents a harmonic suppression technology based on a series of compensation, conducting simulations to demonstrate its effectiveness to suppress the inter-harmonic. The characteristic of voltage fluctuation caused by harmonic is first introduced; then the principle and structure of series compensation are pointed out; finally, by modeling and simulation, series voltage compensator is proved effective to suppress inter-harmonics.

Key words: series compensation; inter-harmonic; electric arc furnace; power quality

(上接第 37 页)

Application of AGC/AVC in Photovoltaic Power Station

WEI Shi-gui, LIU Shuang

(Nanjing Sino-German Protection & Substation Control System Co.Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: High-capacity photovoltaic power generation system connected with grid has some influences on the control of system power exchange and voltage quality in high-voltage power transmission grid. For the safety and stability of power system and improving the quality of power supply, AGC/AVC should be allocated in photovoltaic power station. This paper introduces the structure, control method, control strategy and control flowchart of AGC/AVC in photovoltaic power station. The system has been successfully used in photovoltaic power stations in Ningxia Province and achieves good results.

Key words: photovoltaic power station; AGC; AVC; control strategy