

瞬时无功理论在动态无功补偿控制系统中的应用研究

李元龙, 尹 雷

(连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘 要: 本文分析了单相瞬时无功功率理论的原理, 给出了利用单相瞬时无功理论检测动态无功补偿控制系统中单相无功功率的方法, 指出了该方法的不足, 并提出了改进方案, 实验表明控制器在无功的快速检测上满足设计要求, 并能有效减小误差, 适合于快速补偿分相无功的应用。)

关键词: DSP; 动态无功补偿; 分相; 瞬时无功理论

0 引言

随着现代电力电子技术的发展, 各种电力电子装置, 尤其是大功率变流、变频装置在电力系统的广泛应用给工业和电力企业的电能变换带来巨大方便, 并在工业生产过程中得到了广泛的应用, 有些甚至已成为大型工矿企业的关键环节。但这些装置功率因数往往很低, 给电网带来额外负担并影响供电质量。在电力系统中, 电压和频率是衡量电能质量的两个最基本、最重要的指标。为确保电力系统的正常运行, 供电电压和频率必须稳定在一定的范围内。频率的控制与有功功率的控制密切相关, 而电压控制的重要方法之一是对电力系统的无功功率进行控制。电压损耗与输送的有功功率及无功功率有关, 而在输送有功功率一定的情况下, 电压损耗主要取决于输送的无功功率。无功功率不足或者过剩是造成电压质量下降的主要原因之一, 所以对无功功率进行合理的补偿也是解决电压质量问题的一个重要方面。为保证发电机的出力效率, 通常系统电源只提供少量的无功功率, 大量的无功功率需要采用不同的无功补偿方式进行补偿。

1 三相瞬时无功理论

传统意义上对于正弦信号有功功率、无功功率、有功电流、无功电流都是在平均值和相量的意义上定义的。需要求出电压有效值 E 、电流有效值 I 和两者之间的相位差 φ , $EI\sin\varphi$ 即为传统定义的无功功率。由于算出正弦信号有效值和相位需要在一个周期内才能实现, 所以很难满足快速性要求。

设三相电路电压和电流瞬时值分别为 e_a 、 e_b 、 e_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c , 有功功率和无功功率的表达式为:

$$p = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}}[(e_b - e_c)i_a + (e_c - e_a)i_b + (e_a - e_b)i_c]$$

传统理论中的有功功率、无功功率都是在平均值基础或相量的意义上定义的, 它们只适用于电压、电流均为正弦波时的情况。而瞬时无功功率理论中的概念, 都是在瞬时值的基础上定义的, 它不仅适用于正弦波, 也适用于非正弦波和任何过渡过程的情况。从以上各定义可以看出, 瞬时无功功率理论中的概念, 在形式上和传统理论非常相似, 可以看成传统理论的推广和延伸。

2 单相瞬时无功理论

仿照三相电路有关瞬时有功功率、瞬时无功功率的定义, 将电压、电流矢量的点积定义为瞬时有功功率, 电压、电流矢量的叉积定义为瞬时无功功率。可得瞬时有功功率、瞬时无功功率分别为:

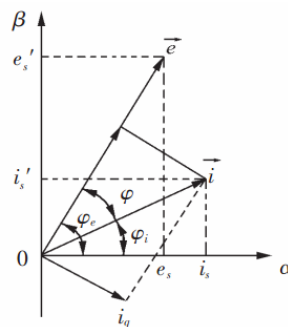


图 1 α - β 坐标系中单相电压、电流矢量图

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} = ei \cos \varphi = e_s i_s + e'_s i'_s$$

$$q = \bar{e} \times \bar{i} = ei \sin \varphi = e'_s i'_s - e_s i'_s$$

将 e_s 、 i_s 、 e'_s 、 i'_s 代入无功表达式得到：

$$q = \bar{e} \times \bar{i} = ei \sin \varphi = e'_s i'_s - e_s i'_s = 2EI \sin \varphi$$

由此得到的有功功率 P 和无功功率 q 分别是单相电路有功功率 P 和无功功率 q 的 2 倍。可见，由此计算得到的单相无功功率值与正弦信号无功定义计算的结果是一致的。然而，单相瞬时无功理论是在单相信号为正弦波的基础上提出的，对于非正弦波的情况，它较三相瞬时无功理论有一定的局限性。因此电压、电流信号进行调理后的 0-3V 的六路电压信号，再经过 A/D 转换后的数字信号不可以直接用于无功计算。此外，在实际系统中，电压和电流为一个一个的采样数据点，根据上述公式计算得到无功功率瞬时值数据点。而这些无功功率瞬时值数据点包含了实际系统中一些高频干扰，也就是说在正弦波中含有谐波的情况下，计算单相无功就会出现误差。在检测单相无功功率时，希望滤除这些谐波干扰形成的结果，从而对无功检测和控制具有参考意义。在对无功功率进行滤波时，可采用滑动平均窗方法。设滑动窗长度为 M ，计算采样点 k 处无功功率的平均值。当 $1 < k < M$ 时，计算 $1 \sim k$ 点的平均值作为结果；当 $k > M$ 时，计算 $k-M+1 \sim k$ 点的平均值作为结果。

3 动态无功补偿中分相无功检测的实现

3.1 动态无功补偿中分相无功检测

应用上述单相瞬时无功理论可以快速计算动态无功补偿控制系统中各分相的无功功率。实现方法为：对于每一单相，每隔 1/4 周期采样一次电压电流值，作为当前采样值 e_s 、 i_s ，前一次的采样值作为 e'_s 、 i'_s ，这样便可在每 1/4 周期间隔时间内就算出一次无功功率值。为使无功计算的速度得到进一步提高，可将每个周期内采样的点数增加。比如：每个周期内采样 20 个点，每采样一个瞬时值，取其作为 e_s 、 i_s ，取前面与之相差 5 个点 (90°) 的值作为 e'_s 、 i'_s ，这样便可将无功计算周期缩短至 1/20 周期。依此类推，在每个周期内采样 N (4 的整数倍) 个点，取当前电压电流采样值和与之相差 $N/4$ 个点 (90°) 的电压电流采样值，分别作为单相瞬时无功理论的 e_s 、 i_s 和 e'_s 、 i'_s ，就可将无功计算周期缩短至 $1/N$ 周期。

3.2 动态无功补偿中分相无功检测的实现

动态补偿研究的重点之一是无功功率的计算

和检测。采用传统方法首先需要在一定周期内对线路电压、电流和两者之间的相位差进行分析和估计，在此基础上再进行无功功率的计算，这难以满足动态快速的要求。因此，本系统应用瞬时无功理论对动态无功补偿控制系统的无功功率进行计算。瞬时无功功率理论于 20 世纪 80 年代被提出，突破了以周期为基础的传统功率定义，可以根据系统采样的瞬时值计算出瞬时无功，满足动态无功补偿控制系统快速连续动作的要求。瞬时无功理论首先提出时仅适用于检测三相无功，后被扩展为单相瞬时无功理论，应用在单相无功检测中。通过实验验证单相瞬时无功理论能否快速计算出各分相无功功率，以及改进方案能否有效减小谐波造成的误差。本实验以三相精密测试源 JCD4060 为实验源，对 JKF 系列分相低压动态无功补偿控制器的单相无功补偿功能进行了实验验证。JCD4060 精密测试电源是一种智能化工频三相谐波功率电源。它可以输出幅度、频率、相位高度稳定的正弦波电压和电流，还可以任意设定输出电压、电流中所含的高次谐波分量。设定 a 相电压为正弦信号，有效值 e_a 为 220V，基波频率为 50Hz；a 相电流信号为正弦信号，有效值 i_a 为 20A，相位滞后电压 30° 。在 a 相电压和电流中分别加入 5% 的五次谐波后，由单相瞬时无功理论计算得到的 a 相瞬时无功功率，可知此时无功功率的误差超过 10%。以每个周期采样 16 个点为例，采样周期为 0.00125s，采样数据如表 1 所示。

表 1 有谐波无功功率采样值

采样时间	采样值
0	1211.35
0.00125	1100.50
0.00250	991.65
0.00375	1101.30
0.00500	995.15
0.00625	1100.30
0.00750	995.45
0.00875	1101.30
0.01000	1211.45
0.01125	1101.65
0.02350	991.85
0.01375	1101.30
0.01500	1210.30
0.01625	1101.65
0.01750	995.15
0.01875	1100.30

取滑动窗长度 N 为 4，由滑动平均窗算法对以上数据进行计算，可知在第四次采样时，即经过

0.00375s 后, 所计算的无功达到稳定值。在无功快速变化的情况下, 无功变化三个采样周期后, 可达到新的稳定值, 即响应时间为三个采样周期, 可快速响应系统的无功变化。以电压、电流分别加入各次谐波大小 5% 为例, 滑动平均窗算法对于不同次谐波的抑制效果如表 2 所示。

表 2 滑动平均窗算法对于不同次谐波的抑制效果

谐波次数	加谐波后最大误差/%	滑动平均值最大误差/%
3	10.16	2.231
5	10.05	0.233
7	10.06	2.331
9	10.07	0.202
11	10.12	2.156
13	10.16	0.207

根据上表比较采用滑动平均窗算法前后无功功率的最大误差, 可见滑动平均窗算法可有效减小各次谐波造成的误差。

以上对动态无功补偿控制系统中的无功功率快速检测法及其改进方案进行了实验验证。实验结果表明, 单相瞬时无功理论能快速计算出各分相无功功率, 改进方案能有效减小谐波造成的误差。

3.3 系统实现检测电路

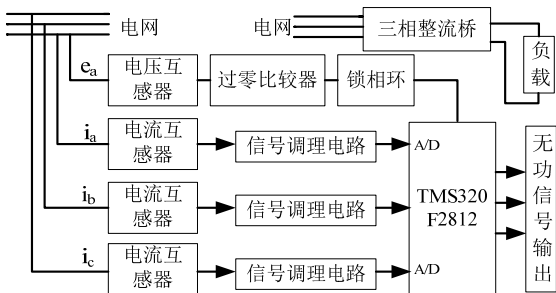


图 2 无功信号检测电路硬件系统结构图

如图 2 所示, 互感器把电压电流信号变成了电流信号, 经过 I-V 变换后送入信号调理电路。信号调理电路主要是对其进行稳压、滤波和调幅处理, 确保调理后信号的电压范围与 DSP 的 ADC 通道的

电压范围 (0~3.3V) 匹配, 同时也可以提高分辨率, 降低噪声。信号检测电路的关键部分是同步信号检测模块, 其目的是动态跟踪电力系统的频率变化, 产生与电网同频同相的方波信号。经过隔离降压后的 a 相电网电压 e_a 引入过零比较器, 并通过 PLL 锁相环电路, 得到与 a 相电网电压 e_a 同步的信号, 并送入 DSP-TMS320F2812。

4 结论

本文针对目前无功补偿装置及相关技术进行了较为深入的研究, 并在此基础上, 设计和开发了 JKF 系列分相低压动态无功补偿控制器, 能够实时补偿点焊过程中引入的无功功率, 并抑制快速波动性负荷造成的电压波动和闪变, 改善了负荷不平衡状况并提高焊接质量及生产效率。

参考文献:

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
[2] 凌青, 郭育华. 基于单相瞬时无功功率理论的谐波及无功电流检测[J]. 黑龙江科技学院学报, 2004, 14(2).
[3] 练志峰, 陈颖, 黄振华. 瞬时无功理论在 SVC 无功功率检测中的应用[J]. 电源世界, 2007(3).
[4] 程翔, 贾宇鹏. DSP 数字信号处理器发展及应用简介[J]. 山东电子, 2003(1): 26-30.

作者简介:

李元龙 (1975-), 男, 四川人, 工程师, 从事电力系统安全管理, E-mail: ly1bj111@126.com;
尹 雷 (1979-), 男, 江苏人, 工程师, 从事电力科技信息管理工作。