

# 一种基于 DFT 的简化的功率测量方法

张晓斌, 常 越, 王达开, 王娇娇

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 传统基于 DFT 的功率测量算法需要基于电流 DFT 的结果得到电流基波向量的相位与幅值, 并结合锁相环中得到的相电压基波向量的相位和幅值进行运算, 运算量庞大。介绍一种简化的功率计算方法, 通过选取合适的电流 DFT 起始点, 可以直接通过电流 DFT 结果的实部、虚部与相电压幅值得到有功功率和无功功率, 极大缩减计算量, 减小 DSP 的计算压力。通过 Simulink 对上述计算方法进行仿真分析, 对比仿真结果与理论计算所得的结果, 最终验证了算法的可行性和有效性。

**关键词:** 功率测量; DFT; Simulink

中图分类号: TM 933.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)07-0089-04

## A Simplified Power Measurement Algorithm Based on DFT

ZHANG Xiaobin, CHANG Yue, WANG Dakai, WANG Jiaojiao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The traditional power measurement algorithm based on DFT needs to obtain the phase and amplitude of the current fundamental wave vector according to the result of current's DFT, and then the operation would be performed according to the phase and amplitude of the phase-voltage fundamental wave vector obtained in phase-locked loop. Introduce a simplified power measurement algorithm. The real part and imaginary part of the current DFT's result can be used with the phase voltage amplitude to get the active power and reactive power by selecting proper starting point of DFT, which would reduce the amount of calculation and the pressure of DSP. The algorithm was simulated through Simulink software. The compare of results obtained by simulation and theoretical calculation proved the feasibility and availability of the algorithm.

**Key words:** power measurement; DFT; Simulink

## 0 引 言

变频器等电力电子设备已广泛应用, 对其输出功率进行测量十分必要。对交流电路的功率测量有多种方法, 大体上可分为利用专用的功率测量芯片测量、利用算法对采样获取的电压电流信息进行运算<sup>[1]</sup> 2 种方法。利用功率测量芯片的方案操作简便, 但需要的专用芯片一般价格较高, 使整体成本增高; 而采样加算法的方案成本低廉, 但算法一般较为复杂, 同时会增加 DSP 的运算压

力<sup>[2]</sup>。在利用算法对功率进行测量的诸多方案中, 基于傅里叶变换的功率测量算法因其可以直接分离出基波成分和谐波成分, 方便地计算基波功率, 应用广泛。

传统的基于傅里叶变换的功率测量方法需要先通过电流 DFT 结果的实部和虚部运算得到电流基波向量的相位与幅值, 进而结合相电压向量的相位与幅值进行计算, 运算量较庞大, 极大地压缩了其他计算任务所能获取的计算能力, 同时也对 DSP 的计算能力提出了更高的要求。本文以

作者简介: 张晓斌(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

常 越(1959—), 男, 副教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

王达开(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

DFT 功率测量算法为研究对象,首先介绍了传统的基于 DFT 的功率测量方法,对原理进行了简要分析;然后,提出了一种简化的 DFT 功率测量方法;最后,通过 MATLAB/Simulink 仿真,对算法的正确性进行了验证。

## 1 传统基于 DFT 的功率测量方法

对于 1 个带宽有限的周期信号  $x(t)$ , 设其周期为  $T$ , 基波角频率为  $\omega$ , 频带宽度为  $\omega \sim N_{\max} \times \omega$ , 则其傅里叶变换的表达式为

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t) \quad (1)$$

其中:

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3)$$

将式(1)~式(3)进行离散化,可得  $A_n$ 、 $B_n$  和  $x(t)$  的离散化表达式如下:

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\tau) \cos(n\omega k\tau) \quad (4)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k\tau) \sin(n\omega k\tau) \quad (5)$$

$$x(k\tau) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} A_n \cos(n\omega k\tau) + B_n \sin(n\omega k\tau) \quad (6)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

式中:  $N$ ——每个基波周期的采样点个数;

$\tau$ ——两个采样点间的时间间隔,  $\tau = T/N$ ;

$x(k\tau)$ ——第  $k$  个采样点的采样值<sup>[3-4]</sup>。

基于上述原理,可以对测量的电流值进行 DFT,进而可以获取  $A_n$  和  $B_n$ 。 $A_n$ 、 $B_n$  与电流向量的关系如图 1 所示。

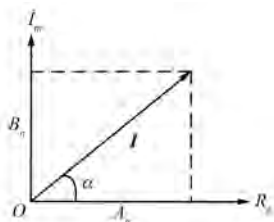


图 1 电流向量与  $A_n$  和  $B_n$  关系

图 1 中,  $\alpha$  为电流向量与实轴的夹角,同时也是 DFT 计算起始点对应的相位角。易看出,  $A_n$ 、 $B_n$  即为电流向量在实轴、虚轴上的分量。

将电流向量与电压向量画在同一图中,如图 2 所示。

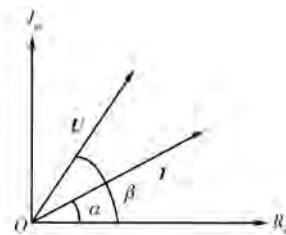


图 2 电压向量与电流向量关系

若要计算有功功率,则需要获得电流向量  $I$  在电压向量  $U$  上的分量,即:

$$P = \frac{1}{2} |U| |I| \cos(\beta - \alpha) \quad (7)$$

计算无功功率则需获取  $I$  在  $U$  垂直方向上的分量:

$$Q = \frac{1}{2} |U| |I| \sin(\beta - \alpha) \quad (8)$$

式(7)、式(8)中,电压向量的幅值  $|U|$ 、电压向量与实轴的夹角  $\beta$  通过锁相环 PLL 即可获取,而电流向量的幅值  $|I|$ 、电流向量与实轴的夹角  $\alpha$  则需要通过对电流 DFT 的结果进行运算获取<sup>[5]</sup>:

$$|I| = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (9)$$

$$\alpha = \arctan \frac{B_n}{A_n} \quad (10)$$

通过上述分析可知,为了获取电流向量在电压向量上的分量,需进行 1 次除法、1 次反三角函数、2 次平方、1 次开方、2 次三角函数运算。如此巨大的计算压力将占用大量的 DSP 计算资源,在 DSP 计算能力极其有限的情况下,可能会导致计算速度不够或者限制计算频率的提高。

## 2 简化的基于 DFT 的功率测量方法

通过选取适当的 DFT 起始点,可以极大地简化上述运算。

DFT 起始点示意图如图 3 所示。

在 A 点 ( $t = 0$ ), 根据坐标变换及锁相环理论<sup>[6]</sup>, 选取电压通用矢量和  $d$  轴重合。

利用这一特点,可以将 A 点设为电流 DFT 采样的起始点。在这种情况下的电压向量和电流向量的关系如图 4 所示。对比图 2 和图 4 易知,在 A 点开始进行 DFT 运算即为  $\beta = 0$  的特殊情况。

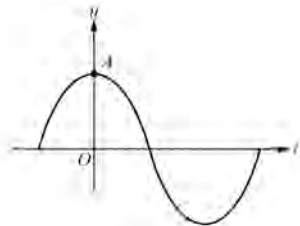


图3 DFT 起始点示意图

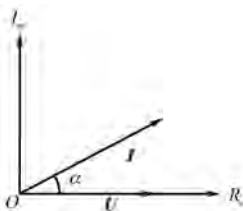


图4 特殊情况下电压、电流向量关系

在该情况下,有功功率、无功功率的计算公式分别为

$$P = \frac{1}{2} |U| |I| \cos(\alpha) = \frac{1}{2} |U| A_n \quad (11)$$

$$Q = \frac{1}{2} |U| |I| \sin(\alpha) = \frac{1}{2} |U| B_n \quad (12)$$

与上面介绍的传统 DFT 算法相比,通过选取适当的 DFT 计算起始点,可以避免许多中间过程,进而直接通过  $A_n$ 、 $B_n$  和  $|U|$  算出有功功率和无功功率,简化了运算,节省了 DSP 的计算资源。

3 仿真分析

利用 MATLAB/Simulink,对 1 个三相 RL 负载的有功功率、无功功率进行测量。对比本文提出的简化 DFT 算法的结果与直接通过公式进行理论计算的结果,对算法的正确性进行验证。仿真电路包括锁相环、主电路、电流 DFT 计算、功率测量 4 个部分。仿真主电路如图 5 所示。

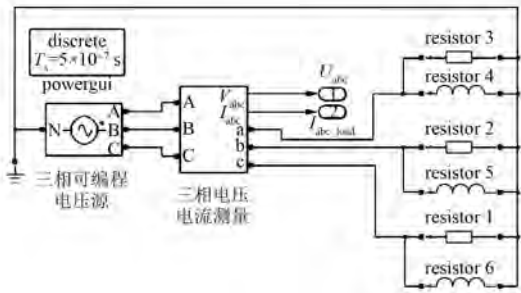


图5 仿真主电路图

系统关键参数如表 1 所示。

表 1 系统关键参数

| 参数名称               | 参数值       |
|--------------------|-----------|
| 电压源线电压有效值/V        | 380       |
| 电阻 $R/\Omega$      | 2         |
| 电感 $L/H$           | 0.01      |
| 测量模块 Base Power/VA | 641 276.5 |
| 测量模块 $U_{nom}/V$   | 1 190     |

整个仿真在标么值系统下进行。根据表 1,通过计算可以得到电压、电流折算的比例参数,如式(13)、式(14)所示:

$$U_{phase-ground}(V) = U_{abc}(p.u.) \times U_{base}(V) = U_{abc}(p.u.) \times U_{nom} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \approx U_{abc}(p.u.) \times 971.63 \quad (13)$$

$$I_{abc}(A) = I_{abc}(p.u.) \times I_{base}(V) = I_{abc}(p.u.) \times \frac{P_{base}}{U_{nom}} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \approx I_{abc}(p.u.) \times 440 \quad (14)$$

3.1 电流 DFT 模块

对测量电流进行 DFT 的计算任务封装在 s-function 模块<sup>[7]</sup>中,原理与前面所述的简化 DFT 算法一致。模块的输入为三相电流测量值,输出分别为三相电流 DFT 的  $A_n$ 、 $B_n$ 。为了对电流 DFT 的结果进行初步验证,对 DFT 的结果进行反变换(s-function 模块 Cal\_Goal),进而与原始的电流采样波形进行比较,检验采用的仿真如图 6 所示。

计算所得的电流波形与实测的电流波形对比如图 7 所示。可见,DFT 变换再反变换后所得的电流波形与实测波形基本重合。

需要注意的是,在 DFT 运算模块与最终的功率计算中间,插入了 1 个相位转换模块。因为对于 A、B、C 三相,其 DFT 运算起始时刻都是 A 相电压向量的  $q$  轴分量为零的时刻,故在计算最终功率时,需要将这部分相位差考虑进去。

3.2 功率结果

在验证电流 DFT 结果的正确性后,对输出功率进行测量,与理论值进行对比。功率测量的算法将以前面提出的简化 DFT 算法为依据,仿真电路如图 8 所示。

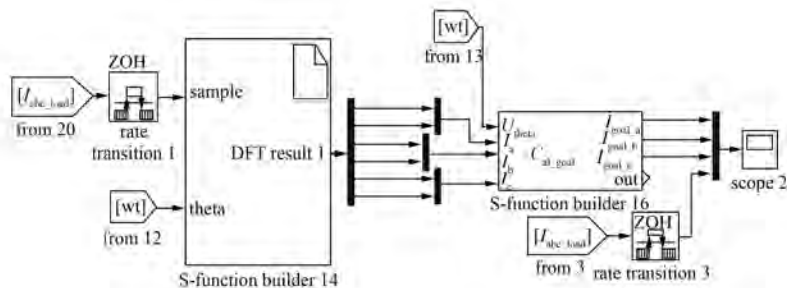


图6 电流对比仿真电路

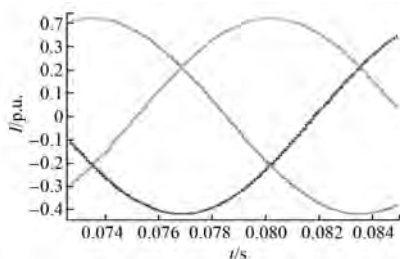


图7 DFT 计算电流与测量电流波形图

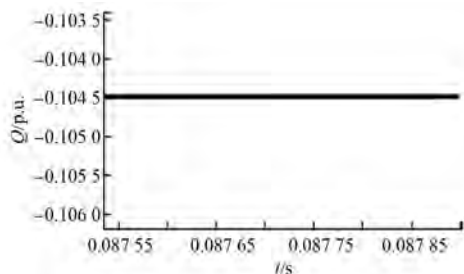


图10 无功功率波形图

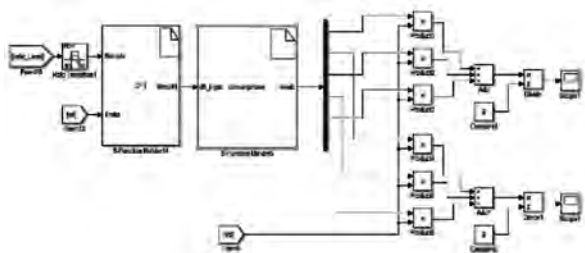


图8 简化的 DFT 功率计算仿真电路

利用简化的 DFT 算法计算所得到的有功功率、无功功率分别如图 9、图 10 所示。

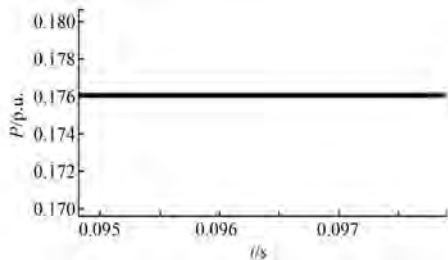


图9 有功功率波形图

根据式(13)、式(14)计算所得的比例参数, 计算仿真有功功率、感性无功功率:

$$P = 0.176 \times 971.63 \times 440 \approx 75\,243$$

$$Q = 0.1045 \times 971.63 \times 440 \approx 44\,675$$

根据系统参数, 计算理论有功功率和无功功率:

$$P = \frac{U^2}{R} \times 3 = \frac{220^2}{2} \times 3 = 726\,000$$

$$Q = \frac{U^2}{\omega L} \times 3 = \frac{220^2}{100\pi \times 0.01} \times 3 \approx 462\,190$$

仿真结果与理论计算结果的误差:

$$\Delta P = \frac{P_{\text{matlab}} - P_{\text{theory}}}{P_{\text{theory}}} \times 100\% = 3.64\%$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{matlab}} - Q_{\text{theory}}}{Q_{\text{theory}}} \times 100\% = 3.34\%$$

以上计算结果充分证明, 仿真结果与理论值之间的差值在误差允许范围内, 验证了简化算法的正确性。

## 4 结 语

介绍了传统的基于 DFT 的功率测量方法, 对 DFT 的原理进行了简单介绍; 然后提出了一种简化的 DFT 计算方法, 通过选择合适的 DFT 计算起始点, 减少了计算量, 降低了 DSP 的计算压力; 最后, 通过 MATLAB/Simulink 仿真对提出的算法进行验证。试验结果证明了所提算法的正确性。

(下转第 121 页)

- 电压穿越改进控制研究[J].电机与控制应用, 2016, 43(6): 69-73.
- [7] 周明, 葛江北, 郭飞, 等. 改善连锁脱网的风电场群电压无功紧急控制策略[J].电力系统自动化, 2016(5): 71-77.
- [8] 陈鹏伟, 肖湘宁, 杨洋, 等. 含 STATCOM 的双馈风电场无功协调补偿策略[J].现代电力, 2016, 33(1): 8-13.
- [9] 姚霞, 刘建华, 陈斌, 等. 低压 TSC 无功补偿装置投切策略优化设计[J].电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 144-149.
- [10] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J].电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.
- [11] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J].中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.
- [12] 万航羽, 黄梅. 双馈风力发电机建模及谐波分析[J].电机电器, 2008, 27(6): 53-57.
- [13] 何健, 丁晓群, 陈光宇, 等. 基于 DFIG 与 SVC 的风电场无功电压协调控制策略[J].电力建设, 2015, 36(5): 1-6.
- [14] 高磊, 朱方, 赵红光, 等. 东北—华北直流互联后东北电网发电机组 PSS 参数适用性研究[J].中国电机工程学报, 2009, 29(25): 19-25.
- [15] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化[J].中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27.
- [16] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联电网 PSS 参数优化设计[J].电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-11.
- [17] 姜惠兰, 姜哲, 李天鹏, 等. 风机转子撬棒投切对电力系统暂态稳定性的影响[J].电网技术, 2016, 40(8): 2383-2388.
- [18] 黄涛, 陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J].电网技术, 2014, 38(10): 2759-2765.
- [19] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J].电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
- [20] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J].电力系统保护与控制, 2016(4): 129-136.
- [21] 程苗苗, 刘万辉, 冯凯. 一种新型静止无功补偿器的研究[J].电力电子技术, 2016, 50(1): 56-58.
- [22] 刘晓军, 杨冬锋, 高磊. 一类多静止无功补偿器阻尼控制器间的交互影响机理[J].电网技术, 2016, 40(2): 534-540.
- [23] 黄占勇. 电力系统静止无功补偿技术的现状及发展[J].科技视界, 2016(1): 117.

收稿日期: 2017 -11 -06

(上接第 92 页)

### 【参考文献】

- [1] 李海国, 常越, 王达开, 等. 变频器输出有功功率测量方法研究[J].电机与控制应用, 2017, 44(4): 107-111.
- [2] 王亚康. 功率算法发展与介绍[J].机电工程技术, 2016(增刊 2): 14-19.
- [3] ORFANIDIS S J. Signal Processing[M].北京:清华大学出版社, 2010.
- [4] 钟晓剑. 模块化三相四线制并联型有源电力滤波器数字控制及实现[D].杭州:浙江大学, 2014.
- [5] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M].北京:电子工业出版社, 2011.
- [6] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I, et al. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions [C] // Power Electronics Specialists Conference, 2006 PESC'06 37th IEEE, 2006: 1-7.
- [7] 瞿婷婷, 周静, 卫佳骏, 等. 基于 Simulink/S-Function 模块的数据采集板卡硬件驱动开发[J].自动化技术与应用, 2016, 35(5): 41-45.

收稿日期: 2018 -01 -03

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

追踪行业最新动态