

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18206

交流变频调速系统仿真建模及谐波特性分析

曾令华, 程亮, 张靖宗

(武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

Simulation Model of AC Variable Frequency Speed Regulation System and Harmonic Characteristics Analysis

ZENG Linghua, CHENG Liang, ZHANG Jingzong

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

摘要: 随着电力电子技术的发展, 交流变频调速系统以其强大的优势逐渐取代传统的直流调速传动, 其在给人们生产生活带来方便和效率的同时, 也造成了电力系统谐波污染加重的问题。因此, 设计了一种开环正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)控制的交流变频调速系统并搭建仿真模型, 实现了对系统中变频器输出电压频率和幅值及电机转速的灵活控制。对系统网侧电压和电流进行了谐波特性分析, 结果表明: 网侧电压的波形比较理想、畸变很小, 而电流波形畸变严重; 且随着变频器输出频率的增加, 电压波形畸变程度有所加剧, 电流畸变程度有所减轻。

关键词: 变频调速; 变频器; 异步电动机; 谐波分析

ABSTRACT: With the development of power electronics technology, AC frequency conversion speed regulation system gradually replaces the traditional DC speed regulation drive with its strong advantages. It brings convenience and efficiency to people's production and life, but also causes the problem of aggravating harmonic pollution in power system. Therefore, this paper designed an open-loop sinusoidal pulse width modulation (SPWM) controlled AC variable frequency speed regulation system and built a simulation model, which realized the flexible control of the frequency and amplitude of the output voltage of the converter, as well as the motor speed. Furthermore, the harmonic characteristics of the voltage and current on the grid side of the system were analyzed. The simulation results show that the waveform of the voltage is ideal and its distortion is very small, but the current waveform distortion is serious. In addition, with the increase of the inverter output frequency, the distortion degree of voltage waveform is intensified, and the current distortion is reduced.

KEY WORDS: frequency speed regulation; inverter; asynchronous motor; harmonic analysis

0 引言

电力电子技术的迅猛发展带来了交流变频调速技术的革新^[1-2], 传统的直流调速传动正越来越多地被交流变频调速所取代。交流电机采用变频调速技术, 是当今电机调速的主要潮流, 具有体积小、重量轻、通用性强、操作简便等优点^[3]。此外, 在调速范围、调速精度、工作效率等方面它也有很强的优势, 因此深受电气、钢铁、石油、电力机车等传统工业领域的欢迎。不仅如此, 变频交流电机在洗衣机、空调、电冰箱等家电产品中得到了广泛的应用, 极大地改善了人们的生产及生活质量^[4-5]。

交流变频调速技术以其所具有的调速范围宽、调速精度高、机械特性较硬、工作效率高等优点而逐渐成为电气传动的主流技术。然而, 变频调速技术一方面给人们的生产和生活带来了方便和效率, 另一方面也使电力系统的非线性负荷明显增加, 造成谐波污染加重的问题, 从而导致矛盾的局面^[6-8]。因此, 建立变频调速系统仿真模型并对其谐波进行分析具有重要意义。

本文首先利用 MATLAB/Simulink 软件搭建了开环正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)控制的交流变频调速系统仿真模型。与传统的变频调速系统相比, 本文搭建的模型主要通过对外控模块进行编程产生调制信号控制逆变器工作, 从而能够按照不同的需求对

变频器输出电压幅值和频率进行控制,进而使电机工作转速发生相应的变化。然后在模型相关参数及仿真结果的基础上,分析了其对网侧谐波的影响,着重从电压电流总谐波畸变率和各次谐波含有率2个衡量指标进行了评价。

1 异步电动机变频调速控制方式

异步电动机是交流变频调速系统中的负载部分,通过改变变频器输出电压的频率,就可以改变异步电动机的转速^[9]。

从电机学原理可知,异步电动机的转速表达式^[10]为

$$n = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (1)$$

式中: f_1 为电机的定子供电频率; p 为电机极对数; s 为转差率。当转差率变化不大时,转速近似正比于频率 f_1 。

三相异步电动机所采用的变频控制方式有V/F控制、直接转矩控制以及矢量控制等实现方式^[11]。改变异步电动机定子绕组供电电源的频率 f_1 ,可以改变同步转速 n ,从而改变转速。如果频率 f_1 连续可调,则可平滑的调节转速,此为变频调速原理。

三相异步电动机运行时,忽略定子阻抗压降时,定子每相电压为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44f_1N_1k_m\Phi_m \quad (2)$$

式中: E_1 为气隙磁通在定子每相中的感应电动势; f_1 为定子电源频率; N_1 为定子每相绕组匝数; k_m 为基波绕组系数; Φ_m 为每极气隙磁通量。

如果改变频率 f_1 ,且保持定子电源电压 U_1 不变,则气隙每极磁通 Φ_m 将增大,会引起电动机铁芯磁路饱和,从而导致过大的励磁电流,严重时会使绕组过热而损坏电机,这是不允许的。因此,降低电源频率 f_1 时,必须同时降低电源电压,以达到控制磁通 Φ_m 的目的^[12]。对此,需要考虑基频(额定频率)以下的调速和基频以上调速2种情况。进行基频以下变频调速时采用恒转矩调速的控制方式,进行基频以上变频调速时采用恒功率调速的控制方式,如图1所示。

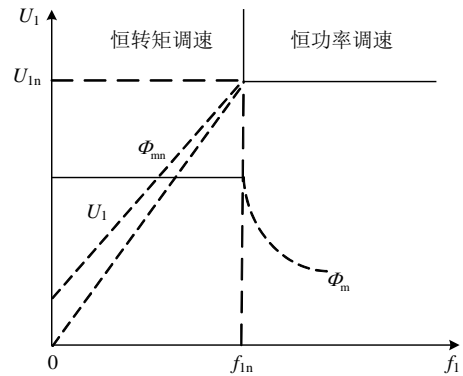


图1 异步电动机变频调速的控制特性

Fig. 1 Control characteristics of variable voltage variable frequency speed regulation for asynchronous motor

2 交流变频调速系统仿真

2.1 仿真模型结构拓扑

图2为交流变频调速系统仿真模型拓扑结构图,主要由整流器、逆变器,滤波装置,外部控制模块及异步电动机5部分组成。其中,前4个模块是电压型交-直-交变频器模型的主要组成部分,外控模块通过编程产生相应的调制信号进而控制逆变器工作。系统的基本工作原理是:首先从10 kV配电网中获得三相对称交流电,然后经过不可控整流电路,滤波电路和由外控模块调整的逆变器将固定频率和幅值的三相工频交流电变为合适的交流电提供给电动机,电动机产生电磁转矩带动负载工作^[13]。

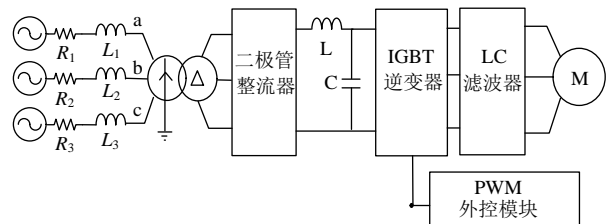


图2 交流变频调速系统拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of AC variable frequency speed regulation system

2.2 相关参数设置

模型相关参数设置如下:三相电压源额定电压 $U_N=10$ kV,额定频率 $f=50$ Hz,额定容量 $S_N=10$ MW;变压器容量 50 kV·A,变比 10 kV/600 V,采用yn11,D接线;电动机功率 $P_N=3\times 746$ W,额定电压 $V_N=380$ V,额定频率 $f=50$ Hz。LC滤波

回路中 $L=200 \times 10^{-6}$ H, $C=5\ 000 \times 10^{-6}$ F。

2.3 仿真结果

通过改变模型外控环节中的控制变量，模拟变频器输出电压的频率由工频 50 Hz(幅值 380 V)到基频以上 70 Hz(幅值 380 V)再到基频以上 30 Hz(幅值 322 V)的变化，实现了异步电动机进行变频加速调速和变频减速调速。

图 3 为仿真得到的逆变器输出侧的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)波形，由一系列周期性的矩形波组成。在 0.4 s 时，输出频率发生了突变，每个矩形波的面积也明显增大，波形的周期也相应变长。

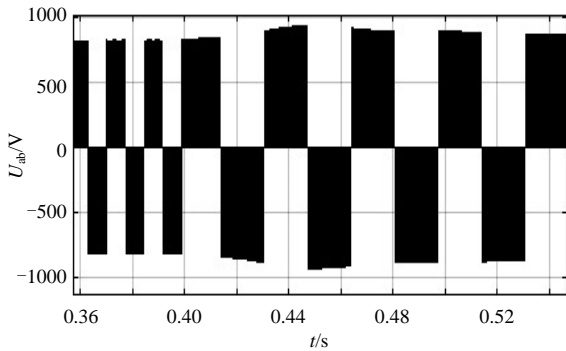


图 3 逆变器输出的 PWM 波形

Fig. 3 PWM waveform of inverter output

异步电动机定子三相电流波形和转速响应波形分别如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出，在进行变频调速时，电流和转速都经过了一定时间的振荡过程，但最终都能够稳定在相应的输出值附近。具体而言：当输出电压频率为 50 Hz 时，经过约 0.15 s 的振荡后，电机转速稳定在 1 475 r/min 左右；当改变输出频率为 70 Hz 时，经过约 0.13 s 的振荡后，电机转速稳定在 2 051 r/min 左右；当

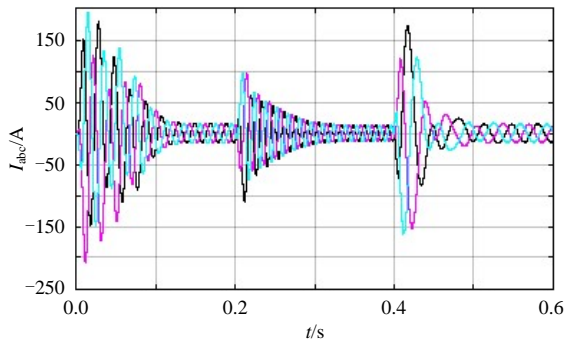


图 4 定子三相电流

Fig. 4 Stator three-phase current

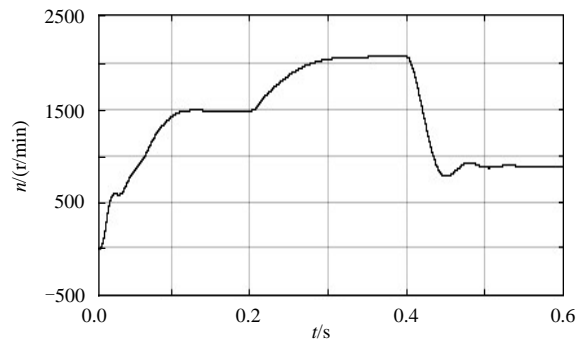


图 5 转速响应波形

Fig. 5 Speed response waveform

改变输出频率为 30 Hz 时，经过约 0.12 s 的振荡后，电机转速稳定在 875 r/min 左右。此外，对比电机电磁转矩的仿真结果还可以看出，由于在仿真过程中输入的电机负载转矩没有改变，所以当系统能够稳定的输出某个转速时，电机的电磁转矩都稳定在输入的负载转矩值。

图 6 和图 7 分别为网侧电压波形和网侧电流波形。对其局部放大后可以看出，网侧电压波形接近正弦波，畸变程度较小；而网侧电流波形则为一系列的马鞍波，波形的前沿相对比较平缓，畸变程度较大。

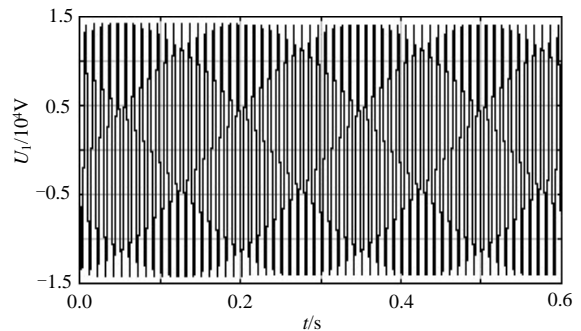


图 6 网侧电压波形

Fig. 6 Voltage waveform on the grid side

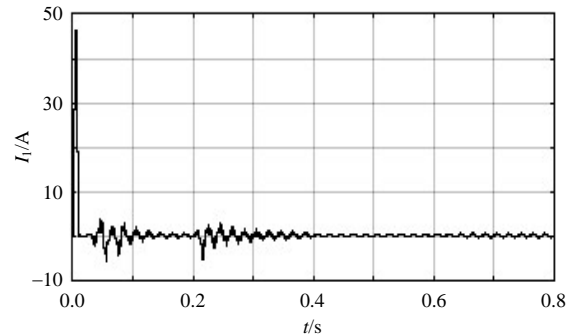


图 7 网侧电流波形

Fig. 7 Current waveform on the grid side

3 系统谐波特性分析

3.1 谐波产生机制

从谐波产生的机制看, 电网高次谐波产生的根本原因是由于电力系统中某些设备和负荷的非线性特性, 即所加的电压与产生的电流不成线性关系而造成的波形畸变^[14-16]; 本文所搭建的模型变频器部分采用了通用的交-直-交型变频器, 由于二极管和晶闸管等非线性电力电子器件的使用, 导致变频器从电网中吸取能量的方式不是连续的正弦波, 而是以脉动的断续方式向电网索取电流, 这种脉动电流和电网的沿路阻抗共同形成脉动电压降叠加在电网的电压上, 使电压发生畸变^[17]。

六脉波整流电路流过变压器二次侧的是周期性变化的非正弦电电流, 它包含有谐波分量。设电源为如下三相平衡电源^[18]:

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}E \sin \omega t \\ e_b = \sqrt{2}E \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ e_c = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (3)$$

式中 E 为电源电压的有效值。电流为正负半周各 120° 的方波, 三相电流波形相同, 且依次相差 120° 。

其有效值与支路电流的关系为

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (4)$$

对于周期性的非正弦函数, 只要周期函数满足狄利赫里条件, 就可以把非正弦的周期函数分解为一个收敛的无穷三角级数(傅里叶级数), 级数中每一项都是一个正选函数。以 A 相电流为例, 将电流正负半波的中点作为时间零点, 对 I_a 进行傅里叶级数分解, 可得

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \\ &\quad \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots) = \\ &\quad \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin \omega t + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \times \\ &\quad \sum (-1)^k \frac{1}{n} \sin n\omega t = \\ &\quad \sqrt{2} I_1 \sin \omega t + \sum (-1)^k \sqrt{2} I_n \sin n\omega t \\ &\quad (n = 6k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (5)$$

则电流基波的有效值和各次谐波的有效值分别为:

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (6)$$

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n\pi} I_d \quad (n = 6k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

可以看出, 电流中仅含有 $6k \pm 1$ (k 为正整数) 次谐波, 各次谐波有效值与谐波次数成反比, 且基波有效值的比值为谐波次数的倒数。

通用的交-直-交型变频器采用了三相桥式不可控整流电路, 其交流侧谐波主要由如下规律:

1) 脉动数 $P=6$, 谐波次数主要为 $6k \pm 1$ 次, $k=1, 2, 3, \dots$, 即谐波中 5、7、11、13、17、19、... 次谐波含量丰富;

2) 谐波次数越高, 谐波幅值越小;

3) 基波电流和各次谐波电流的有效值与输入电压有效值、滤波电感、滤波电容和负载都有关;

4) 谐波与基波的关系是不固定的, 负载越轻, 则谐波越大, 基波越小; 滤波电感越大, 则谐波越小, 而基波越大。

3.2 谐波特性分析

3.2.1 单一输出频率下的谐波特性

采用快速傅里叶变换对网侧电压波形和网侧电流波形进行谐波分析, 得到频率为 30 Hz 时的波形频谱分别如图 8 和图 9 所示。从图中看到, 电压总谐波畸变率为 0.18%, 电流总谐波畸变率为 100.73%, 两者畸变程度相差很大。但两者的谐波组成有如下相同规律: 1) 谐波中 $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 次谐波含量比较丰富, 而其他次谐波含量

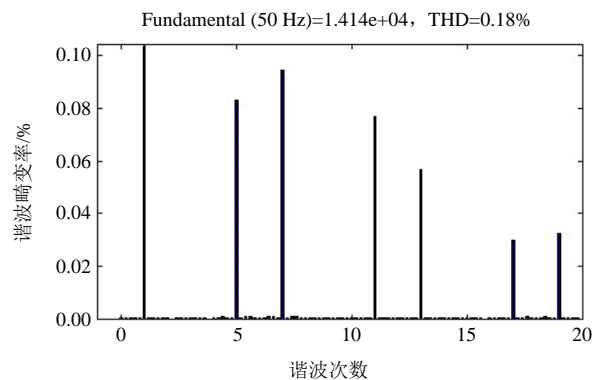


图 8 网侧电压波形频谱

Fig. 8 Voltage waveform spectrum on the grid side

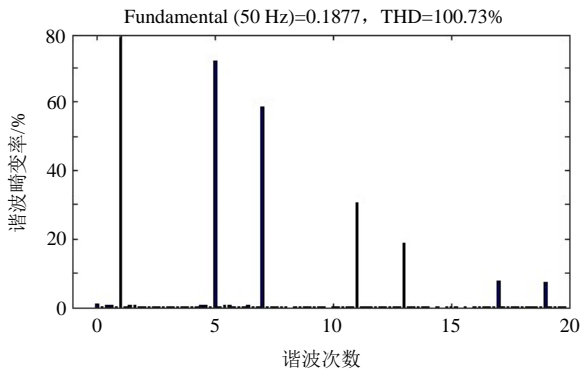


图9 网侧电流波形频谱

Fig. 9 Current waveform spectrum on the grid side

较小。这是因为模型采用的是三相桥式不可控整流电路。2) 谐波次数越高, 谐波幅值相对越小。对网侧波形有较大影响的主要是 5、7、11、13、17、19 次谐波。

3.2.2 不同输出频率下的谐波特性比较

当电机稳定工作在不同转速条件下时, 变频器输出的频率是不同的。调整相应参数设置, 使变频器分别输出频率为 30、50、70、90、110 Hz 的电压, 分别统计不同频率下系统稳定工作时的网侧电压、电流总谐波畸变率及其 5、7、11、13、17、19 次谐波含有率, 分析比较不同输出频率下系统的谐波特性。

电压总谐波畸变率和电流总谐波畸变率如图 10 所示。当输出电压频率从 30 Hz 增加到 110 Hz 时, 电压总谐波畸变率从 0.18% 增加到 0.36%, 电流总谐波畸变率从 100.73% 减小到 84.91%。由此可见, 随着输出频率的增加, 电压总谐波畸变率逐渐增加, 而电流总谐波畸变率逐

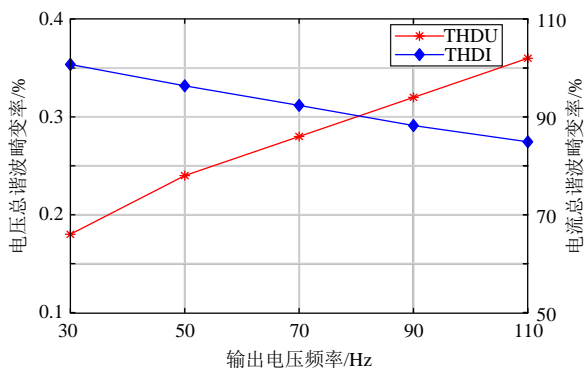


图10 总谐波畸变率

Fig. 10 The total harmonic distortion of voltage and current

渐减小。且在不同输出频率下, 电流总谐波畸变率都远大于电压总谐波畸变率。

图 11 和图 12 分别显示了不同输出频率下调速系统产生的 5、7、11、13、17、19 次谐波电压和谐波电流含有率的情况。从图 11 可以看出, 当输出频率增加时, 各次电压谐波含有率均呈上升趋势, 且随着谐波次数的增加, 电压谐波含有率相应有所减小。从图 12 可以看出, 当输出频率增加时, 各次谐波电流含有率均成下降趋势, 且随着谐波次数的增加, 各次谐波电流含有率也相应有所减小。

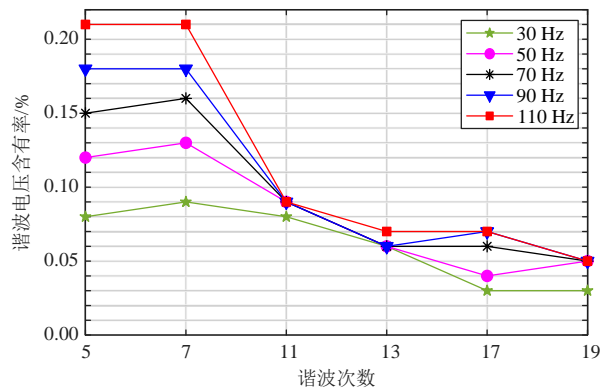


图11 谐波电压含有率

Fig. 11 Harmonics voltage ratio

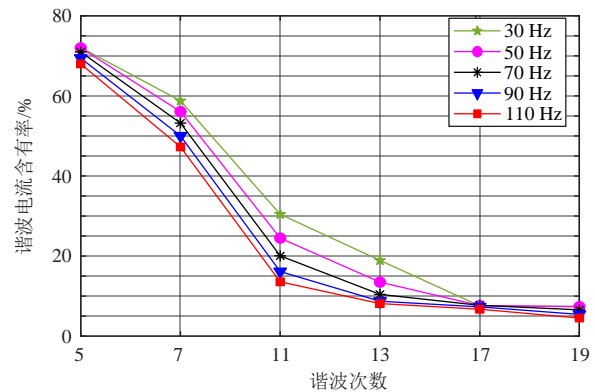


图12 谐波电流含有率

Fig. 12 Harmonics current ratio

4 结论

在建立交流变频调速系统仿真模型的基础上, 分析了系统网侧电压和电流的总谐波畸变率及各次谐波含有率情况, 同时比较了不同输出频率下网侧电压和电流的谐波特性, 得出以下结论:

- 1) 交流变频调速系统稳定工作时, 网侧的电

压总谐波畸变率较小, 电流总谐波畸变率较大。

2) 电压和电流谐波中都是 $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 次谐波含量比较丰富, 而其他次谐波含量较小。且随着谐波次数增加, 谐波幅值相对减小。

3) 随着输出电压频率的增加, 电压总谐波畸变率相应增加, 电流总谐波畸变率相应减小; 同时, 电压各次谐波含有率相应增加, 电流各次谐波含有率相应减小。

参考文献

- [1] 王久和. 统一电能质量调节器控制策略研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 313-321.
- [2] 李养俊, 何子春, 张强, 等. 火力发电厂电能质量测试与评估分析[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 135-139.
- [3] 周启章. 变频调速异步电动机转矩设计分析[J]. 电机技术, 2001(2): 3-5.
- [4] 刘春刚. 变频调速异步电机的仿真计算[J]. 中小型电机, 1995(2): 54-58.
- [5] 王宏. 异步电动机矢量控制变频调速系统的建模与仿真研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2017, 13(4): 353-356, 375.
- [6] 倪梅娟, 张小青, 肖如泉. 变频器的电能质量问题及解决措施[J]. 电气技术, 2007(11): 34-37.
- [7] 陈子辉, 王硕君, 刘勇浩, 等. 基于数据质量的电能质量监测装置远程可靠性评估[J]. 广东电力, 2017, 30(1): 73-78.
- [8] 李瑞, 谢乔富, 崔荧莹, 等. 基于功率预估和阻抗校正法的主导谐波源追踪[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 73-79.
- [9] 贾建强, 韩如成, 左龙. 基于 MATLAB/SIMULINK 的交流电机调速系统建模与仿真[J]. 电机与控制学报, 2000, 4(2): 91-93.
- [10] 王坤, 王义兵, 鄢进冲, 等. 交流电机变压变频调速系统控制方式的分析[J]. 电工技术, 2017(8): 50-53.
- [11] 丁辉, 胡协和. 交流异步电动机调速系统控制策略综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 50-58.
- [12] 杨耕, 郑伟, 陆城, 等. 弱磁运行下异步电动机调速系统的转矩及功率特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(7): 873-878.
- [13] 肖雄. 双 PWM 变频调速系统综合控制策略研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [14] 胡怀伟. 模糊控制理论在变频调速系统中的实现[J]. 电工技术, 2017(5): 47-50.
- [15] 李瑞, 谢乔富, 崔荧莹, 等. 基于功率预估和阻抗校正法的主导谐波源追踪[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 73-79.
- [16] Vedad Bećirović, Ivica Pavić, Božidar Filipović-Grčić. Sensitivity analysis of method for harmonic state estimation in the power system[J]. Electric Power Systems Research, 2018(154): 515-527.
- [17] Ye C, Wang T Y, Yuan Y. Design of small variable frequency speed regulation system based on ARM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 635: 1155-1158.
- [18] 邵如平, 韩正伟, 林锦国. 电能质量指标分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 118-121.

收稿日期: 2018-10-22。

作者简介:



曾令华

曾令华(1993), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量, zlh_wuhu2013@163.com;

程亮(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与控制;

张靖宗(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量。

(责任编辑 辛培裕)