

一种变频电机参数离线辨识方法的研究

李昱兵, 张德春, 陈 跃

(长虹美菱股份有限公司 技术研究中心, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 传统电机参数辨识采用固定脉冲宽度调制(PWM)波占空比。该方法导致电流大小不可控,而辨识电流大小又直接影响辨识准确性。为此,提出新的参数离线辨识方法,采用恒电流辨识原理并检测电机相电流,控制辨识电流在给定值附近波动,解决了电机辨识电流不合适问题。设计了续流二极管和IGBT电压模型, d 轴和 q 轴电感辨识都采用在 270° 而非 0° 进行辨识,以此提高了辨识精度。最后,在变频冰箱上进行验证并与原来数据进行对比。该方法很好地解决了冰箱电机带背压条件下,电机 d 、 q 轴电感辨识不准确、辨识时间长等问题,试验结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 参数自适应; 参数离线辨识; 电阻辨识; 电感辨识

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)01-0064-06

Research on Off-Line Identification Method of Inverter Motor Parameters

LI Yubing, ZHANG Dechun, CHEN Yue

(Department of Research Centre, Changhong Meiling Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: The parameters identification method of traditional motor often used fixed pulse width modulation (PWM) wave duty cycle, which led to uncontrollable identification current, and the accuracy of identification and was directly affected by the size of identified current. A new parameters off-line identification method was proposed, which was based on the principle of constant current identification. It solved the problem of inappropriate identification current of motor by detecting the phase current of motor and controlling the fluctuation of identification current near the given value. The model of the fly-wheel diode and IGBT voltage was designed, which required that both d axis and q axis inductance identification should be carried out at 270° instead of 0° , thus it could improve the identification accuracy. Finally, the method was applied to the frequency conversion refrigerator, and the experimental results were compared with the original data. This method could effectively solve problems such as inaccurate identification of the d , q axis inductance and long identification time of the refrigerator motor with back pressure. The experimental results showed that the new method was feasible and effective.

Key words: parameter adaptive; parameter off-line identification; resistance identification; inductance identification

0 引 言

电机种类繁多,电机参数一般由电机生产厂家提供(如果自己测试,则需要使用专门的设备),这对变频控制器软件及电机参数的管理带

来了问题。当用户变频产品出现问题时,需要知道电机的型号,再查询电机的参数。当电机种类繁多时,对维修提出了很高的要求。特别是目前电机的运行,需要对电机进行控制参数的匹配,对开发生产提出了很高的要求,费时费力。如果能

作者简介: 李昱兵(1975—),男,博士,高级工程师,研究方向为智能控制、电机控制、传感器算法与应用。

张德春(1975—),男,高级工程师,研究方向为电机控制技术及应用。

陈 跃(1964—),男,教授级高级工程师,研究方向为电机驱动技术、驱动模型及应用。

够利用变频控制器本身的硬件,配合相应的控制软件,在电机起动前获得相对准确的电机参数,自动匹配电机控制参数,从而顺利地起动电机运行,就能够避免前述一系列问题。

电机参数离线辨识,一般通过控制 IPM 逆变器 6 只 IGBT 的脉冲宽度调制(PWM)波占空比,控制 IGBT 的导通或者关断,并采用等效电路,利用欧姆定律获得电机电阻;利用 RL 充电方程获得电机的 d 、 q 轴电感^[1];采用电压注入的方法获得电机转子漏感和互感的方法^[2],也需要配合等效电路进行计算。高频注入法^[3]则需要满足电机具有凸极性($L_d < L_q$)的条件,利用控制器产生的电源来实现辨识。采用文献[4]的方法辨识电机电感,需先使电机运转起来,这样需要合适的参数才有可能,造成辨识困难。文献[5]实现的辨识方法,需要改进硬件连接,也不理想。文献[6-8]采用的等效电路辨识电阻方法,未考虑 IGBT 和续流二极管的电压降对辨识的影响。文献[9-13]适合于电机参数在线辨识,需要电机转动起来,在电机参数未知的情况下,电机起动困难,而且文献[9]需要满足电机具有非凸极性($L_d = L_q$)条件。文献[14-15]介绍的方法,如果用于电机参数辨识,也需要电机先转动起来。

本文寻求一种电机参数离线辨识方法,通过这种方法获取电机的主要参数如电阻 R 和 d 、 q 轴电感 L_d 、 L_q 。利用获取的电机参数,通过通用模型和算法,可以自动调整电机的控制参数、控制电机的运行。对于冰箱电机,如何获得背压条件下电机的参数,是本研究希望解决的技术课题。

传统的参数辨识方法没有考虑电机电阻和电感大小的不同以及需要的辨识 PWM 波占空比的不同,造成不同的电机流入电机线圈的电流大小不同。有的电机由于流进电机线圈的电流太小,无法达到电机后续电感辨识时正确定位到 0° 或者 270° 辨识的目的。如果电机辨识使用的 PWM 波占空比过大,流进电机线圈的电流过大,存在造成电机退磁的技术风险,特别是对电阻进行辨识时,由于没有考虑 IGBT 和续流二极管电压降对电阻辨识精度的影响,还会对后续依赖于电机电阻值进行的 L_d 和 L_q 辨识带来进一步的辨识误差。对于电机背压条件下的定位,也没有考虑背压时电机存在的瞬时移动,造成定位不准确,带来

参数辨识不准确问题。

为了克服传统参数辨识方法存在的问题,本文建立了新的模型和算法,通过获取流入电机线圈的电流,控制辨识 PWM 波占空比:当检测电流低于给定的电流时,加大 PWM 波占空比,而当检测电流高于给电流时,减小 PWM 波占空比。通过曲线拟合方法,获得控制器 IGBT 和续流二极管电压降之和,提高电机参数辨识的精度。为了克服电机参数背压辨识不准确问题,特别在每次辨识之前,对于 L_d 、 L_q 辨识,重新定位到 270° ,解决了电机参数背压辨识不准确的技术问题。同时,为了快速起动电机运行,特别建立了电阻、电感 L_d 和电感 L_q 的辨识顺序,充分利用上一次电机转子的位置进行参数辨识。

1 变频电机参数辨识原理

在电机控制所需逆变器上桥臂任意 1 只 IGBT 控制端输入 PWM 波,另外 4 只 IGBT 施加固定的高低电平对开关管进行开通或者关断,使得电流从开通的上桥臂 IGBT 流入电机线圈,从另外两路下桥臂流出。利用上下桥臂 PWM 波占空比以及直流母线电压数值,通过等效电路,利用电压、电阻关系,在电流稳态条件下,获得电机电阻。

d 、 q 轴电感的辨识原理是:利用获得的电机电阻,通过电机方程获得电机电流充电方式,同时获取充电过程中流入电机线圈的电流和对应的时间,获得电机的 d 、 q 轴电感。

为了节省辨识时间,提高电机起动速度,达到快速制冷的目的,采用如下的方法进行电机参数辨识:首先定位到 0° ,辨识电机电阻,关闭 PWM 波,让电机线圈充分放电;之后,电机转子定位到 270° ,关闭 PWM 波,放电完成后,发送指向 270° 的控制矢量,辨识 d 轴电感;然后,关闭 PWM 波,让电机线圈充分放电,再定位到 270° ,发送指向 0° 的控制矢量,辨识 q 轴电感。

1.1 电阻辨识

发送指向 0° 的控制矢量 $U_1(100)$,将电机转子从当前任意角度 θ 转动到 0° 方向,即 α 方向,如图 1 所示。图 1 中 E_{dc} 代表直流母线电压采样值, α 、 β 为固定坐标轴。

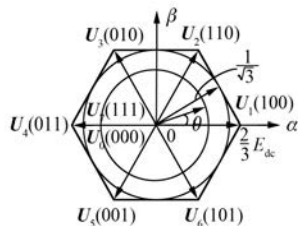


图1 六边形 0° 矢量图

为了适配所有的冰箱电机的参数辨识, 特别限制流进电机线圈的电流数值的大小, 使得电流从 u 相流入, 从 v 相和 w 相流出, 将电机转子定位到 0°。如图 2 所示, 在 $0 \sim t_1$ 时间内, 检测流入电机 u 相线圈的电流, 自动调整 PWM 波占空比; 在 $t_1 \sim t_2$ 时间内, 以当前 PWM 波稳定运行一段时间; 在 t_2 时刻, 利用 u 相 PWM 波占空比、直流母线电压 E_{dc} 和当前电流检测值 I_0 , 计算电机相电阻。

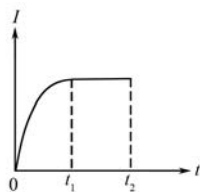
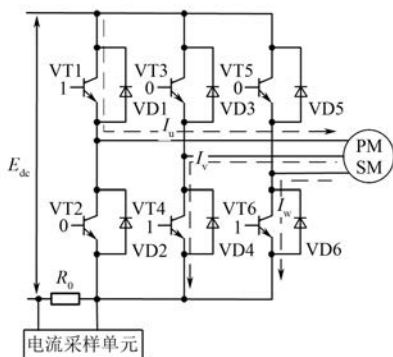
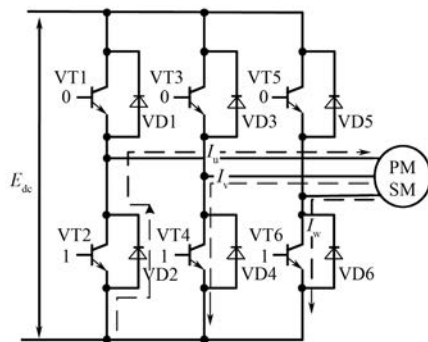


图2 电阻辨识时序图

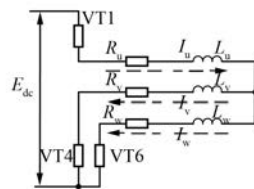
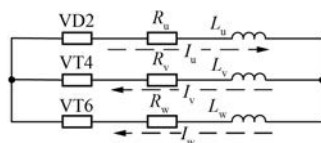
利用三角波载波调制方法控制 PWM 波的发生, 等效为对电机施加有效矢量 $U_1(100)$ 和零矢量 $U_0(000)$ 2 个电压矢量。当施加 $U_1(100)$ 时, 电流流动方向如图 3 中虚线所示; 当施加 $U_0(000)$ 时, 电流流动方向如图 4 中虚线及箭头所示。

图3 矢量 $U_1(100)$ 电流图

在矢量 $U_1(100)$ 控制下, T_{on} 时间内, 电流流

图4 矢量 $U_0(000)$ 电流图

进电机 u 相绕组, 然后从 v、w 两相流出, 此状态下的等效电路如图 5 所示。假设电机三相参数一致, $R_u = R_v = R_w = r$, 则电流满足 $I_u = -2I_v = -2I_w$ 关系。施加零矢量 $U_0(000)$ 时, 在 T_{off} 时间内, 由于电机内部线圈电感的续流作用, 电流会从与 VT2 并联的反向续流二极管 VD2 中流过, 提供电机 u 相线圈电流, 等效电路如图 6 所示。此时电流满足 $I_u = -2I_v = -2I_w$ 关系。

图5 $U_1(100)$ 等效电路图6 $U_0(000)$ 等效电路

如图 7 所示, 当 VT1 输入 PWM 波时, IGBT 开

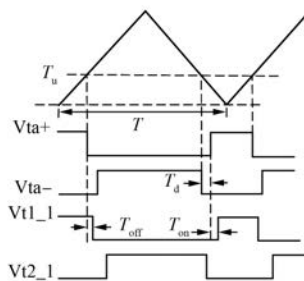


图7 0°定位 PWM 波形图

通时间延时 T_{on} , IGBT 关断时间延时 T_{off} , 则施加 IGBT VT1 的 PWM 波为 V_{t1_1} , 实际到 IGBT VT2 的 PWM 波为 V_{t2_1} , 其中 IGBT 死区时间为 T_d 。

电机运行方程:

$$\begin{cases} V_d = rI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q \\ V_q = L_d \omega I_d + rI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + K_E \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_d, V_q —— d, q 轴电压;

I_d, I_q —— d, q 轴电流;

ω ——转速;

K_E ——反电动势常数。

连续提供图 7 所示的 PWM 波, 在电流足够大的条件下, 最终电机转子转动到固定坐标轴 α 轴方向(即 0° 方向)后静止不动。此时电机转速 ω 为 0, $I_q = 0, I_d = \frac{3}{2}I_u$, 则电机 d 轴方程:

$$V_d dt = rI_d dt + L_d dI_d \quad (2)$$

在一个 PWM 波周期中对式(2)两边积分得:

$$\begin{cases} E_{dc} T_{on} = 2V_s T_{on} + 1.5rI_u T_{on} + 1.5L_d \int_0^{T_{on}} dI_u \\ 0 = V_d T_{off} + 1.5rI_u T_{off} + V_s T_{off} + 1.5L_d \int_{T_{on}}^T dI_u \end{cases} \quad (3)$$

在控制 PWM 波作用时间足够长后, 电流达到稳定状态, 波形如图 8 所示。

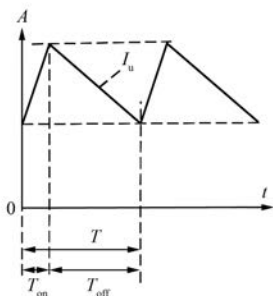


图 8 稳定状态电流图

可见,

$$\int_0^{T_{on}} dI_u + \int_{T_{on}}^T dI_u = \int_0^T dI_u = 0 \quad (4)$$

式(3)加式(4)整理可得:

$$r = \frac{2[(E_{dc} - V_s + V_{sd})T_{on} - (V_s + V_{sd})T]}{3I_u T} \quad (5)$$

式中: T_{on} ——VT1 导通时间;

T_{off} ——VT1 关断时间;

I_u ——电机 u 相线圈流入电流大小数值;

T ——PWM 波周期, $T = T_{on} + T_{off}$;

V_s ——IGBT 正向导通压降;

V_{sd} ——续流二极管 VD2 正向导通压降。

由于在电流 I_u 较小时, $(V_d - V_s)$ 接近于零, 而且 E_{dc} 与 $(V_d - V_s)$ 相比, $(V_d - V_s)$ 属于微量, 可以忽略, 则式(5)可简化为

$$r = \frac{2[E_{dc} T_{on} - (V_s + V_d)T]}{3I_u T} \quad (6)$$

由于式(6)计算电阻需要 $(V_s + V_d)$ 之值, 而 $(V_s + V_d)$ 之值会随着电机线圈电流的大小改变, 故要建立电流和 $(V_s + V_d)$ 之间的关系, 获得 $(V_s + V_d) - I_u$ 关系表。

由式(5)可得:

$$(V_s + V_d) = E_{dc} \frac{T_{on}}{T} - \frac{3}{2}rI_u \quad (7)$$

给定一系列不同电机电阻 r 的条件下, 通过控制 PWM 波不同的占空比, 检测直流母线电压 E_{dc} 和流进线圈的电流 I_u , 使 I_u 从小到大变化, 代入(7)式计算获取 $(V_s + V_d)$ 数值, 再通过最小二乘法进行曲线拟合, 获得电机 $(V_s + V_d) - I_u$ 函数关系, 如图 9 所示。

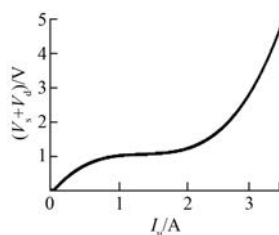


图 9 $(V_s + V_d) - I_u$ 关系图

在电阻辨识时, 采用某个 PWM 波占空比, 获得图 2 中 t_2 时刻的电流 I_0 与直流母线电压 E_{dc} 后, 通过查询电流 I_0 对应的 $(V_s + V_d)$, 就可以通过式(6)获得电机的电阻。

1.2 d 轴电感辨识

初始化 u, v, w 相 PWM 波占空比初值, 使得电流从 w 相流入, 从 v 相流出, u 相电流为零, 此时控制矢量指向 270° 。如图 10 所示, 在 $0 \sim t_3$ 时间内, 根据检测 w 相流入电流, 自动调整 PWM 波占空比大小; 在 $t_3 \sim t_4$ 时间内, 以当前的三相 PWM

波稳定运行一段时间;在 t_4 时刻,检测流入 w 相的电流 I_{w0} ,关断 PWM 波,让电机线圈放电,发送指向 270° 的控制矢量,同时检测此时的电流和对应的时间 t_5 、 t_6 ,通过电机放电方程获取电机的 d 轴电感。

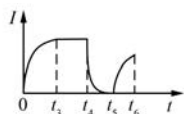


图 10 d 轴电感辨识时序图

发送指向固定坐标轴 270° 方向控制矢量的方法是:交替发出 $U_5(001)$ 、 $U_6(101)$ 以及零矢量 $U_0(000)$ 或 $U_7(111)$ 。 $U_5(001)$ 、 $U_6(101)$ 作用时间相同时,根据矢量合成方法可知,合成矢量指向 270° 方向,如图 11 所示。

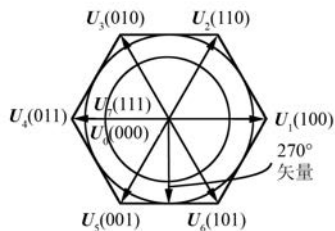


图 11 六边形 270° 矢量图

通过坐标变换,获得此时的 d 、 q 轴电流为

$$I_q = 0, I_d = \sqrt{3} I_w \quad (8)$$

由 $V_d = rI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega I_q$, 电机转速 $\omega = 0$,

得此时电机 d 轴方程为 $V_d = rI_d + L_d \frac{dI_d}{dt}$ 。

即

$$I_d = \sqrt{3} I_{w0} (1 - e^{-\frac{r}{L_d} t}) \quad (9)$$

由式(8)获得 t_6 时刻 d 轴电流方程分别为

$$I_{d1} = \sqrt{3} I_{w0} (1 - e^{-\frac{r}{L_d} (t_6 - t_5)}) \quad (10)$$

由于 $I_{d1} = \sqrt{3} I_{w1}$, I_{w1} 为 t_6 时刻流入电机 w 相电流检测值,则:

$$L_d = - \frac{r \cdot (t_6 - t_5)}{\ln\left(\frac{I_{w0} - I_{w1}}{I_{w0}}\right)} \quad (11)$$

1.3 q 轴电感辨识

d 轴电感辨识完成后,电机转子处于 270° 方向,关闭 PWM 波,让电机线圈充分放电,之后,发

送指向固定坐标轴 0° 的控制矢量,进行 q 轴电感辨识。

根据 $V_q = L_d \omega I_d + rI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + K_E \omega$, 在电机

定位到 270° 后,关断 PWM 波,随后发送指向 0° 的控制矢量时,由于电机存在惯性,在很短的时间内,电机不会转动,电机转速 $\omega = 0$,由于控制矢量与电机转子垂直,所以 $I_d = 0, I_q = \frac{3}{2} I_u$ 。

由 $V_q = rI_q + L_q \frac{dI_q}{dt}$, 即得

$$I_q = \frac{3I_0}{2} (1 - e^{-\frac{r}{L_q} t}) \quad (12)$$

由式(12)获得如图 12 所示 t_7 时刻 q 轴电流方程分别为

$$I_{q1} = \frac{3I_0}{2} (1 - e^{-\frac{r}{L_q} t_7}) \quad (13)$$

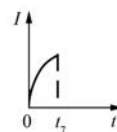


图 12 q 轴电感辨识时序图

由于 $I_{q1} = \frac{3}{2} I_{u1}$, I_{u1} 为 t_7 时刻流入电机 u 相电流检测值,则:

$$L_q = - \frac{r \cdot (t_7 - t_6)}{\ln\left(\frac{I_0 - I_{u1}}{I_0}\right)} \quad (14)$$

2 变频电机参数自适应控制技术理论验证

基于上述方法中的电阻和 d 、 q 轴电感辨识算法公式,更新现有控制算法,将技术成果应用在冰箱上,并让冰箱整机在实验室和常规环境中运行,查看利用此技术后的辨识结果。

表 1 所示为部分变频电机参数辨识结果。从表 1 可见,在冰箱电机带背压和不带背压条件下, d 、 q 轴电感辨识精度较高,结果令人满意,证明变频参数自动辨识的方法可行。

表 1 辨识结果

压缩机 型号	R			L_d					L_q				
	真实值	辨识值	误差	真实值	辨识值	误差	辨识值	误差	真实值	辨识值	误差	辨识值	误差
	/Ω	/Ω	/%	/mH	不带背压 /mH	/%	0.3 MPa 背压/mH	/%	/mH	不带背压 /mH	/%	0.3 MPa 背压/mH	/%
HVD90MTa	6.1	6.37	4.43	36.73	38.82	5.69	37.72	2.70	39.28	39.3	0.05	40.89	4.10
VETB110L	5.6	5.23	-6.61	46.00	45.53	-1.02	49.43	7.46	76.50	77.88	1.80	79.22	3.56
HVD111MX	5.0	5.04	0.80	26.59	27.71	4.21	27.22	2.37	28.26	28.32	0.21	27.59	-2.37
HVD70MTa	6.8	6.63	-2.50	32.35	31.25	-3.40	31.13	-3.77	34.55	31.86	-7.79	32.23	-6.71
LVD70MTa	7.3	7.63	4.52	46.78	48.58	3.85	47.61	1.77	51.02	50.05	-1.90	52.25	2.41
HVD90MX	3.8	3.75	-1.32	31.49	31.01	-1.52	30.27	-3.87	33.02	32.71	-0.94	30.76	-6.84
VETZ90L	5.4	5.35	-0.93	44.44	46.75	5.20	45.04	1.35	74.96	70.92	-5.39	72.27	-3.59

3 结 语

为了解决传统电机参数辨识采用固定 PWM 波占空比所导致的电流大小不可控、辨识不准确或者辨识电流较大导致电机退磁等技术问题,对变频电机的电阻和 d 、 q 轴电感参数辨识的思路和算法进行了优化。将该方法在 ML 品牌冰箱上进行了应用和产业化验证。通过试验结果分析和实际使用来看,新的设计方法是正确的,符合产业化应用要求。

该方法由于主要针对变频电机参数进行辨识处理,能够应用于使用变频电机的相关控制设备上。本文涉及的是基于冰箱变频电机的参数离线辨识方法,但相关技术研究成果和实施思路可应用到使用变频电机的其他产品领域,具有广泛的应用价值。

【参 考 文 献】

[1] 岳魏,高艳霞.永磁同步电机参数离线辨识[J].工业控制计算机,2016,29(2): 37.

[2] 李勇,李智,牛军浩,等.基于矢量控制的异步电机参数离线辨识策略[J].微特电机,2016,44(1): 64.

[3] 张瑞峰,詹哲军,李岩,等.永磁同步电机离线参数辨识方法研究[J].机车电动机,2016(3): 18.

[4] XUE X D, CHENG K W E, CHEUNG N C. Multiobjective optimization design of inwheel switched motors in electric vehicles[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010,57(9): 2980.

[5] HOREN Y, STRAJNIKOV P, KUPERMAN A.

Simple mechanical parameters identification of induction machine using voltage sensor only [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 92: 60.

[6] 戴亮,黄志远,陈业明,等.静止状态下异步电动机参数离线辨识方法[J].微特电机,2014,42(2): 33.

[7] 王莉娜,薛飞.基于 RLS 的永磁同步电机离线参数辨识研究[J].电气传动,2015,45(5): 16.

[8] 史文凡,贾洪平,颜建虎,等.一种改进的电动汽车用异步电机参数离线辨识方法研究[J].电气工程学报,2017,12(5): 28.

[9] 史婷娜,刘华,陈炜,等.考虑逆变器非线性因素的表贴式永磁同步电机参数辨识[J].电工技术学报,2017,32(7): 77.

[10] 李旭春,张鹏,严乐阳,等.具有参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2016,31(14): 139.

[11] 沈小军,李梧桐,乔冠伦,等.同步发电机励磁系统模型参数离线辨识自动寻优方法[J].电工技术学报,2018,33(18): 4257.

[12] 张秀丽,黄旭,杨德亮,等.基于正交投影与多新息 RLS 的 PMSM 参数辨识[J].电力系统保护与控制,2018,46(14): 33.

[13] 姜杰,王学斌,殷家敏,等.基于感应电动机复数简化模型的参数辨识研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(19): 87.

[14] 丁蓝,班诗淇,曾博.基于 RRLS 的电网戴维南等值参数辨识研究[J].电气技术,2017,18(2): 78.

[15] 沈艳霞,靳保龙.永磁同步电机模糊遗忘因子最小二乘法参数辨识[J].系统仿真学报,2018,30(9): 3404.

收稿日期: 2018-10-21