

荧光灯动态 PSpice 模型

戴国骏 杭州电子工学院计算机应用研究所 高济平 浙江大学电机系工自实验室

摘要:本文根据放电正柱区的 Francis 方程,提出了一种全新的荧光灯 PSpice 模型,论述了模型的构造原理和参数的抽取方法,取得了满意的实验结果,为荧光灯电子镇流器的计算机辅助设计和分析提供了一种新的途径。

叙 词:荧光灯 动态 模型

1 概述

随着 PSpice 通用电路仿真软件包功能的增强,其应用越来越广泛,特别是有了功率器件的模型后,在电力电子技术领域内的应用已相当普及。在用 PSpice 通用软件包对荧光灯电子镇流器(ELS)进行仿真的时候,首先碰到的问题是如何处理荧光灯这一个非线性负载。目前我们所见到的 PSpice(5.0)和 PSpice for Windows 的元件库中,还没有荧光灯的模型。

自从 U.S.Mader 和 D.Horn 首次在 IEEE IAS'92 年会上发表荧光灯的 PSpice 模型以来^[1],世界上著名的灯泡和电子镇流器生产商相继发表了荧光灯的 PSpice 模型;如 MagnTek 的 Ning Sun 在 APEC'96 上^[2];LT 的 T.Wu 在 IECON'95 上^[3]发表了荧光灯高频 $v-i$ 的动态模型;另外 OSRAM 公司的 Yiyong Sun 等人,在 LAS'93, '95 年会上报道了如何用 PSpice 模型进行紧凑型荧光灯电子镇流器的设计,但上面这些模型都基于 U.S.Mader 提

出的一个拟合方程即:

$$v(t) = A(\bar{P}_m) i(t) + B(\bar{P}_m) i(t)^3$$

及一个假设:

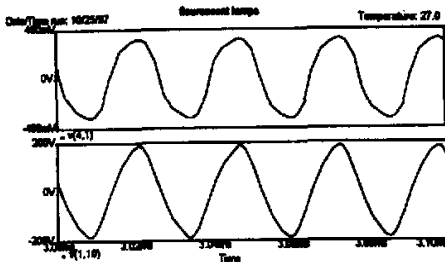
$$\frac{\bar{P}_m(s)}{P_m(s)} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

该模型的缺点是有 6 个待定参数,模型抽取时的计算工作量较大。我们用 Ning Sun 的方法,用 Philips 30WT10 灯管测量的数据进行拟合,其模型的参数见表 1。

表 1 Philips 30WT10 Mader's 模型的 6 个常数

a1	a2	a3	b1	b2	b3
1.1002346	8.5213742	-0.212373	0.255848	0.016147	-3.223145

在用 Class-D 类功率逆变器作为电子镇流器去驱动荧光灯时,其灯电压,灯电流的仿真结果见图 1(a);实验结果见图 1(b)。从两者对比中可以发现:波形的形状比较接近,但是幅值上有较大差别。



(a)



(b)

图 1

其原因是 Mader 提出的拟合方程和一个假设与低气压放电正柱理论的结果不太相符。

2 荧光灯 PSpice 模型的原理及参数抽取

从文献[4]知道,描述荧光灯瞬时灯电压和灯电流关系的

Francis 方程为:

$$dg/dt = Ap_m - Bg \quad (1)$$

g 为灯管瞬时点导, $g = v(t)/i(t)$ 。两边取拉氏变换得:

$$g(s)/p_m(s) = A/(1 + \tau s) \quad (2)$$

我们将根据上面的二个基本方程, 提出一个与 Mader 模型不同的全新 PSpice 模型。在这个模型中, 只有两个待定常数 A 和 τ ; 而在 Mader 模型中, τ 是在 0.5-2ms 任取的, 而不是根据灯管的实际测量数据拟合计算的, 这也可能是造成模型精度不高的原因。

同样利用我们测到的 Philips 30WT10 荧光灯瞬时 $v-i$ 的数据, 把求得各个点的 g 和 dg/dt 计算出来, 详见附表 1。把 Francis 方程重新写成:

$$g(t) + \tau dg(t)/dt = Ap_m \quad (3)$$

对上式两边在 $(0, T)$ 周期内积分, 得:

$$\frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt + \frac{\tau}{T} \int_0^T dg/dt \cdot dt = \frac{A}{T} \int_0^T p_m(t) dt \quad (4)$$

由于

$$\frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt = \bar{g}; \quad \frac{1}{T} \int_0^T dg/dt \cdot dt = \bar{g}'; \quad \frac{A}{T} \int_0^T p_m(t) dt = P_m$$

代入(4)得

$$\begin{cases} \bar{g}_1 + \tau \bar{g}'_1 = AP_{m1} \\ \vdots \\ \bar{g}_6 + \tau \bar{g}'_6 = AP_{m6} \end{cases} \quad (5)$$

这是一个简单的二元线性回归模型, 应用 Mathematica^[5], 求得:

$$A = 0.118e-3, \tau = 0.627e-3$$

3 荧光灯 PSpice 模型的构造

我们利用 PSpice 的电压受控源原理来构造这个模型, 如图 2 所示。

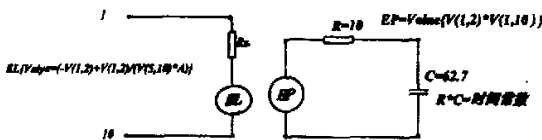


图 2

这里 R_s 为采样电阻, 其阻值为 1Ω ; R, C 选取为 $RC = \tau$ 时间常数, 为其惯性时间。整个模型的 PSpice 子电路描述为:

```
.sbuckl 30WT10Philips 1 10
rsen 1 2 1
el 2 10 value = {v(1,2)/(A * v(5,10)) - v(1,2)}
ep 3 10 value = {v(1,2) * v(1,10)}
rp 3 5 10
cp 5 10 62.71uf
.ends
```

从上面可以看出, 整个电路模型简洁明了。

4 实验结果

我们用上面的荧光灯模型对 Class-D 类功率逆变器构成的电子照明系统进行了仿真, 电路仿真的程序为:

```
fluorescent lamps v134 pulse(10 - 1000.01us 12.
8us 25.6us)
vin 8 9 sin(0 220 50) v250 pulse(-10 1000.01us 0.
01us 12.8us 25.6us)
rxx 8 12 1 c3 4 10 10.72nf
d1 12 2 dln5401 11 10 6 1.4mh
d2 0 12 dln5401 c4 2 6 1uf
d3 0 9 dln5401 c5 60 1uf
d4 9 2 dln5401 rs411
ms1 2 3 4 4 if840 xlamp 1 10 30wt10philips
ms2 4 5 0 0 if840 .probe
ds1 4 2 mur105 .tran 1us 3.5ms 3ms uic
ds2 0 4 mur105 .end
```

图 3(a) 表示计算机仿真的 $v(t), i(t)$ 结果; 图 3(b) 表示实验结果。从图中可以看出, 其幅值及形状基本吻合。

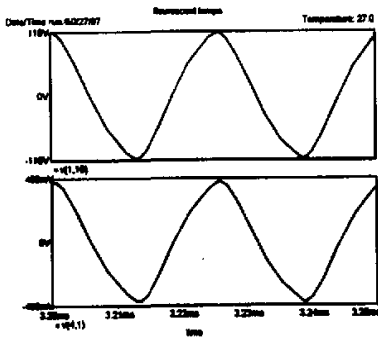
图 4(a) 表示 $v-i$ 之间的仿真波形, 图 4(b) 表示测量波形, 两者也相当吻合。

5 结论

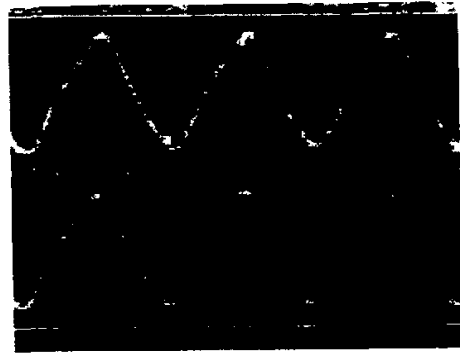
本文根据低气压放电正柱区的理论分析和 Francis 方程, 提出了一个与 Mader 模型本质上不一样的荧光灯动态 v, i 特性的 PSpice 模型, 取得了满意的实验结果; 而且模型参数减少, 可以说是荧光灯动态 PSpice 模型的突破, 为电子镇流器的计算机辅助设计和分析开辟了一条新的途径。

参考文献

- [1] U. Mader and P. Horn, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", IEEE IAS'92, pp. 1928 - 1934, 1992.
- [2] Ning Sun, Bryce Hesterman, "PSpice High Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model" APEC'96, pp. 641 - 647, 1996.
- [3] T. Wu, "A PSpice Model for Fluorescent Lamp Operated at High Frequency", IEEE IECON'95, pp. 359 - 364, 1995.
- [4] Francis V. J. Fundamentals of Discharge Tube Circuits, John Wiley & Sons, Inc, 1948.
- [5] 袁宗常, Mathematica 数学软件应用与程序设计, 北京大学出版社, 1995

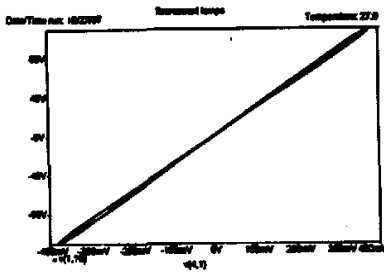


(a)



(b)

图 3



(a)



(b)

图 4

附录一

30W/T10 荧光灯模型的6组测量数据(1)

		$P_{\omega} = 11.565 \text{ W}$				$P_{\omega} = 14.888$				$P_{\omega} = 19.473$			
序号	$i(\mu\text{s})$	$v(\text{V})$	$i(\text{A})$	$g10^{-3}$	g'	$v(\text{V})$	$i(\text{A})$	$g10^{-3}$	g'	$v(\text{V})$	$i(\text{A})$	$g10^{-3}$	g'
1	0.0	90.94	0.208	2.28	-	-123.80	0.195	1.58	-	-119.20	0.289	2.42	-
2	1.4	83.13	0.177	2.12	-107.2	115.90	0.167	1.49	-64.28	106.70	0.250	2.34	-57.14
3	2.8	61.09	0.135	2.21	57.14	87.66	0.133	1.52	21.28	78.44	0.200	2.55	150
4	4.2	31.41	0.073	2.32	78.57	56.41	0.096	1.701	129.3	40.94	0.113	2.76	150
5	5.6	-3.125	-0.042	13.44	7942	3.12	0	0	-1215	0	-0.017	0	-1971
6	7.0	-23.44	-0.115	4.91	-6092	-23.44	-0.125	5.33	3807	-28.13	-0.158	5.61	4007.1
7	8.4	-47.19	-0.229	4.85	-42.85	-55.00	-0.208	3.78	-1107	-55.16	-0.267	4.84	-550
8	9.8	-64.37	-0.240	3.73	-800	-78.44	-0.213	2.72	-757.1	-77.03	-0.283	3.67	-835.7
9	11.2	-78.44	-0.250	3.19	-385.7	-100.3	-0.213	2.12	-428.5	-95.78	-0.296	3.09	-414
10	12.6	-90.94	-0.250	2.74	-321.4	-114.4	-0.217	1.90	-157.1	-109.8	-0.304	2.77	-228
11	14.0	-97.19	-0.250	2.57	-121.3	-122.2	-0.217	1.78	-85.71	-116.1	-0.304	2.62	-107
12	15.4	-94.06	-0.230	2.46	-78.57	-119.1	-0.204	1.71	-50	-113.0	-0.283	2.50	-85.71
13	16.8	-76.87	-0.188	2.45	-7.14	-101.9	-0.175	1.77	7.14	-94.06	-0.238	2.53	21.43
14	18.2	-51.72	-0.135	2.61	114	-72.19	-0.133	1.84	85.71	-59.69	-0.183	3.06	378
15	19.6	-20.47	-0.042	2.05	-400	-28.13	-0.050	1.78	-42.85	-17.19	-0.038	2.21	-607
16	21.0	9.531	0.073	7.66	4007.1	6.25	0.067	10.72	6385	12.50	0.125	10	5564
17	22.4	31.41	0.177	5.64	-1442	40.94	0.167	4.08	-4742	40.63	0.208	5.12	-3478
18	23.8	53.44	0.208	3.89	-1250	65.94	0.196	2.97	-729.8	64.06	0.271	4.23	-635.7
19	25.2	67.50	0.208	3.08	-578	92.50	0.200	2.16	-578.6	87.97	0.279	3.17	-757
20	26.6	83.13	0.219	2.63	-321.4	106.60	0.200	1.87	-207.1	103.60	0.291	2.81	-257
21	28.0	92.50	0.219	2.37	-185.7	119.10	0.200	1.68	-135.7	116.10	0.300	2.81	-164.3
22	29.4	94.06	0.198	2.11	-185.7	125.30	0.196	1.56	-86.71	119.20	0.279	2.34	-171
RMS & AVG		62.22	0.186	2.661	8.7	86.56	0.172	1.92	13.27	81.43	0.234	2.67	5.96

30W/T10 荧光灯模型的 6 组测量数据(2)

		$P_m = 25.23 W$					$P_m = 32.00 W$					$P_m = 37.53 W$			
序号	$t(\mu s)$	$v(V)$	$i(A)$	$g10^{-3}$	g'	$v(V)$	$i(A)$	$g10^{-3}$	g'	$v(V)$	$i(A)$	$g10^{-3}$	g'		
1	0.0	116.30	0.395	3.40	-	116.40	0.521	4.48	-	113.60	0.687	6.04	-		
2	1.4	105.30	0.344	3.27	-92.85	105.50	0.458	4.34	-100	101.10	0.594	5.85	-114		
3	2.8	77.03	0.281	3.65	271.4	72.5	0.365	5.03	492	69.37	0.458	6.61	521		
4	4.2	36.41	0.125	3.43	-157.1	33.44	0.167	4.99	28.57	30.31	0.187	6.17	-314		
5	5.6	-1.719	-0.063	36.65	2300	-3.125	-0.083	26.55	-	0	0	0	-		
6	7.0	-28.28	-0.208	7.36	-20	-28.13	-0.250	8.88	-	-22.34	-0.291	13.03	-		
7	8.4	-52.19	-0.365	6.99	-264	-50.63	-0.438	8.86	-14.12	-42.66	-0.448	10.50	-		
8	9.8	-70.94	-0.396	5.58	-1000	-64.69	-0.479	7.71	-1.03	-58.75	-0.583	9.92	-414		
9	11.2	-88.13	-0.417	4.73	-607.1	-82.03	-0.521	6.35	-757	-75.62	-0.635	8.40	-1085		
10	12.6	-100.6	-0.427	4.24	-350	-99.22	-0.563	5.67	-485	-93.28	-0.687	7.36	-625		
11	14.0	-113.1	-0.448	3.96	-200	-111.9	-0.583	5.21	-328	-108.9	-0.739	6.78	-414		
12	15.4	-110.0	-0.417	3.77	-135	-111.9	-0.531	4.74	-335	-110.5	-0.687	6.21	-407		
13	16.8	-94.38	-0.365	3.87	71.42	-92.81	-0.448	4.82	57.14	-93.28	-0.583	6.25	28.57		
14	18.2	-57.81	-0.260	4.49	443	-53.75	-0.302	5.60	-	-58.44	-0.375	6.42	121.43		
15	19.6	-18.91	-0.063	3.33	-0.83	0	-0.042	0	-	-20.94	-0.083	3.96	-		
16	21.0	9.21	0.114	12.37	-	14.06	0.187	13.3	-	11.25	0.177	15.73	-		
17	22.4	37.81	0.229	6.05	-	39.53	0.302	7.64	42.8	30.00	0.323	10.76	-		
18	23.8	58.13	0.343	5.90	-107	56.72	0.438	7.7	-892	49.22	0.521	10.59	-135		
19	25.2	75.62	0.375	4.96	-671	74.22	0.479	6.45	-757	66.41	0.573	8.63	-1400		
20	26.6	95.94	0.385	4.01	-678	92.97	0.510	5.39	-278	86.88	0.635	7.31	-907		
21	28.0	110.00	0.406	3.69	-228	107.00	0.542	5.0	-450	104.10	0.698	6.71	-428.6		
22	29.4	114.70	0.385	3.35	-242	114.8	0.510	4.37	-450	110.50	0.677	6.13	-414		
RMS & AVG		77.01	0.327	3.91	22.5	76.62	0.418	5.02	25.45	72.46	0.518	6.11	-38.37		