

[配网自动化]

无公式反时限曲线的实现及其自动化测试

文/西门子电力自动化有限公司 孙长元 刘 潮 杜希霞

在配网应用中，有些反时限曲线无法用公式拟合，比如部分 Recloser 曲线（重合器曲线），这给曲线的实现和测试带来了困难。本文采用线性插值挑选出保护算法中需要的电流与延时的对应点，在配网保护装置中实现无公式的 Recloser 曲线，并给出自动化测试的方案。

Recloser 曲线广泛应用于配网重合器中，但它们中的部分曲线无法用简单初等函数公式进行拟合，而保护装置中实现反时限时主要依据公式来计算电流与延时的对应值。如果使用复杂公式来拟合曲线，会增加实现难度，而且拟合的准确性也很难保证。本文讨论无公式反时限曲线的实现与自动化测试。

无公式反时限曲线的实现

1. Recloser 曲线

Recloser 曲线是一种广泛应用于配网重合器中的反时限曲线。其反时限公式为

$$t = \left(\frac{A}{\left(I / I_p \right)^p - C} + B \right) T_p \tag{1}$$

式中， t 是跳闸时间； T_p 是时间定值； I 是故障电流； I_p 是启动定值； $A B C P$ 是公式参数。

传统各 Recloser 的公式参数见表 1。

表 1 Recloser 曲线公式参数

Recloser 曲线	公式参数			
	A	B	C	P
1 (102)	点对点数据			
2 (135)	11.416 1	0.488 986	0.239 257	1.849 11
3 (140)	13.545 7	0.992 904	0.379 882	1.763 91
4 (106)	点对点数据			
5 (114)	点对点数据			
6 (136)	点对点数据			
7 (152)	点对点数据			
8 (113)	1.685 46	0.158 114	0.436 523	1.788 73
8+	1.427 32	-0.003 7	0.366 699	1.701 12
8* (111)	1.423 02	-0.007 85	0.442 626	1.425 29
9 (131)	2.759 78	5.106 47	0.614 258	1.035 3
11 (141)	21.614 9	10.676 8	-0.671 85	2.694 89
13 (142)	点对点数据			
14 (119)	点对点数据			
15 (112)	点对点数据			
16 (139)	点对点数据			
17 (103)	点对点数据			
18 (151)	点对点数据			

(续)				
Recloser 曲线	公式参数			
	A	B	C	P
A (101)	0.208 242	-0.002 37	-1.132 81	2.306 57
B (117)	4.228 86	0.008 933	0.319 885	1.782 2
C (133)	8.760 47	0.029 977	0.380 004	1.807 88
D (116)	5.231 68	0.000 462	0.172 05	2.171 25
E (132)	10.765 6	0.004 284	0.249 969	2.182 61
F (163)	点对点数据			
G (121)	点对点数据			
H (122)	点对点数据			
J (164)	点对点数据			
KG (165)	点对点数据			
KP (162)	11.984 7	-0.000 32	0.688 477	2.011 74
L (107)	点对点数据			
M (118)	点对点数据			
N (104)	0.285 625	-0.071 08	0.464 202	0.911 551
P (115)	点对点数据			
R (105)	0.001 015	-0.133 81	0.998 848	0.002 227
T (161)	点对点数据			
V (137)	点对点数据			
W (138)	15.462 8	0.056 438	0.345 703	1.620 9
Y (120)	点对点数据			
Z (134)	点对点数据			
(200)	点对点数据			
(201)	点对点数据			
(202)	点对点数据			

从表 1 里可以看出部分 Recloser 曲线没有对应的公式，这些曲线是使用故障电流与跳闸时间的点对点数据来定义的。

表 2 里列出了 Recloser 136 曲线的部分点对点数据。

表 2 Recloser 136 曲线的部分点对点数据

I/I_p (M)	时间定值设定 D/s		
	0.2	1	5
1.02	4.718 8	23.594 1	117.970 6
1.04	4.238 0	21.189 9	105.949 7
1.06	3.818 3	19.091 7	95.458 5
1.08	3.451 7	17.258 4	86.292 2
1.1	3.131 0	15.654 9	78.274 5
1.12	2.850 1	14.250 7	71.253 5
1.14	2.603 9	13.019 6	65.098 1

(续)			
I/I_p (M)	时间定值设定 D/s		
	0.2	1	5
1.16	2.387 8	11.939 0	59.695 2
1.18	2.197 9	10.989 3	54.946 7
1.2	2.030 7	10.153 6	50.767 9
1.22	1.883 4	9.417 1	47.085 3
...			
29.78	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.8	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.82	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.84	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.86	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.88	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.9	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.92	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.94	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.96	0.004 0	0.020 0	0.100 0
29.98	0.004 0	0.020 0	0.100 0
30	0.004 0	0.020 0	0.100 0

其中： I/I_p 是故障电流相对于起动定值的倍数（下同）。
Recloser 136 曲线的图形如图 1 所示。

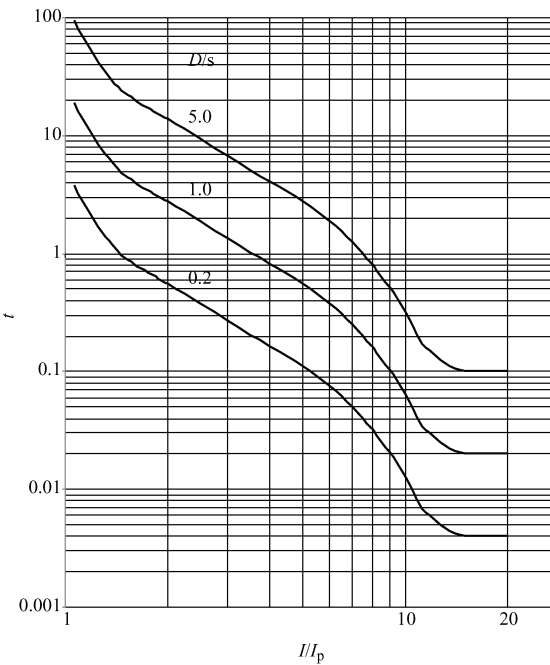


图 1 Recloser 136 曲线的图形

其中， I/I_p 是故障电流相对于起动定值的倍数； D/s 是时间定值； t 是动作时间。

2. 曲线的实现

如图 1 所示，Recloser 136 曲线无法用简单初等函数公式进行拟合，如果使用复杂公式来拟合曲线，会增加实现难度，而且拟合的准确性也很难保证。因此，无法通过公式来实现这类反时限曲线。

在保护装置里实现反时限曲线时，可以根据反时限曲线的衰减特点，定义出 I/I_p 的有限个离散点，见表 3，将这些离散点的延时时间计算并存储下来。然后通过查表法来查找对应故障电流的延时再进行积分。

表 3 I/I_p 的离散点

I/I_p (M)	时间/s
1	25.998 3
1.062 5	18.862 5
1.125	13.942 9
1.187 5	10.675 9
1.25	8.479 7
1.312 5	6.981 5
1.375	5.940 6
1.437 5	5.200 5
1.5	4.659 2
1.562 5	4.250 8
1.625	3.929 8
1.687 5	3.667 8
1.75	3.446 2
1.812 5	3.252 9
1.875	3.079 9
1.937 5	2.922 1
2	2.776 2
2.25	2.279 3
2.5	1.887 9
2.75	1.582 5
3	1.346 8
...	
15	0.020 0
16	0.020 0
17	0.020 0
18	0.020 0
20	0.020 0
21	0.020 0

其中， I/I_p 是故障电流相对于起动定值的倍数。
 对于故障值不在表 2 中的离散点，根据表 2 中前后

两个点的值采用线性插值计算出对应的延时。线性插值公式为

$$T = T_1 + \frac{I - I_1}{I_2 - I_1}(T_2 - T_1) \tag{2}$$

式中， T_1 是前一个点的时间； T_2 是后一个点的时间； I_1 是前一个点的电流值； I_2 是后一个点的电流值。

图 2 为离散点与原始点的比较图。

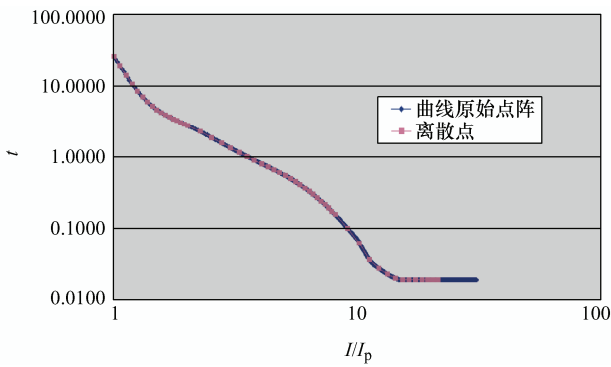


图 2 离散点与原始点的比较

其中， I/I_p 是故障电流相对于起动定值的倍数； t 是动作时间。

可以看出选出的离散点可以很好的拟合 Recloser 136 曲线。

在积分过程中，对于不在这些离散点上的故障电流，根据前后两个离散点的值采用线性插值计算出对应的延时。

通过这种方式就可以实现所有的无反时限公式的 Recloser 曲线。此方法也可以推广到其他无公式的反时限曲线。

无公式曲线的自动测试

1. 自动化测试面临的问题

以往所应用的反时限曲线都是有公式定义，只需在自动化测试模块中填入相关定值以及故障量即可，期望结果都是可以根据公式自动计算出来的。有公式曲线测试模块如图 3 所示。

以图 3 为例，测试 Recloser Curve A(重合器曲线 A) 的精度，这是一条有公式定义的反时限曲线。预先设置动作定值 1，时间延时 20 以及期望输入故障量(1.15，1.45，1.75，2)。测试开始后，1.15，1.45，1.75 和 2 倍

定值的故障电流依次自动输入到装置，每个故障量的测试结果会与预期结果自动进行比较。

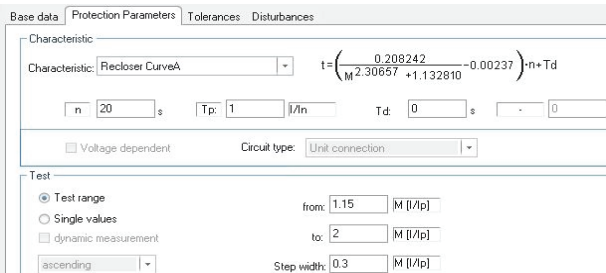


图 3 有公式曲线测试模块

对于部分 Recloser 曲线，因为没有公式定义，所以不能应用图 3 的测试模块。如何对它们进行自动化测试是一个现实的问题。

2. 自动化测试方案

自动化测试系统由 PC 机，试验仪和被测装置三部分组成，如图 4 所示。

这里选择了 Excel 表格来实现自动化测试的目的。Excel 表格功能强大，通过表格自带的 VB 工具，可以调用测试仪控制程序输出交流量至被测装置，并对反馈结果进行评估。

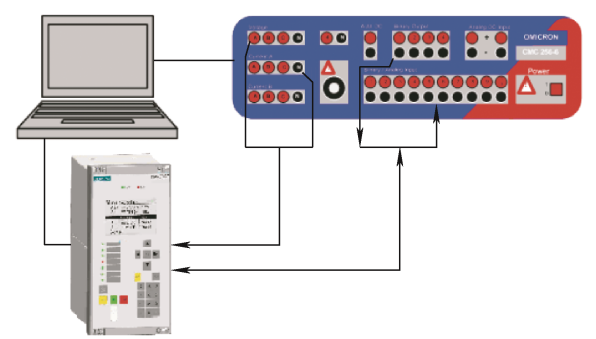


图 4 自动化测试系统

将所有待测曲线的点对点数据放入一张 Excel 表格中，在其中选择每条曲线需要测试的点。如图 5 所示，A 列为故障量，AB 列为对应的预期结果。

其中， I/I_{set} 是故障电流相对于起动定值的倍数；Kyle135-Time 是曲线对应的时间。

根据曲线走势以及测试目的自行决定所选点的稀疏分布。选择完成后导出生成测试表格文件。

	A	AB	AC
1	I/I_{set}	Kyle136-Timer	
6	1.1	15.654890	
7	1.12	14.250690	
8	1.14	13.019620	
9	1.16	11.939040	x
10	1.18	10.989340	
11	1.2	10.153580	x
12	1.22	9.417063	
13	1.24	8.767033	
14	1.26	8.192427	x
15	1.28	7.683628	
16	1.3	7.232277	x
17	1.32	6.831100	
18	1.34	6.473762	
19	1.36	6.154748	x
20	1.38	5.869251	
21	1.4	5.613077	
22	1.42	5.382571	x

图 5 测试点选择

生成的测试文件根据选择的测试点驱动测试仪输出，并对反馈结果自动进行误差分析。测试输出及结果如图 6 所示。

其中， I 是故障电流； T_{soll} 是期望动作时间； T_{ist} 是实际动作时间； $T_{dif}(s)$ 是时间差； $T_{dif}(\%)$ 是误差百分比； P_{ass} 是误差满足要求。

I	T_{soll}	T_{ist}	T_{dif}	T_{dif}	P_{ass}
0.58 A	11.939 s	12.232 s	0.293 s	2.5 %	P_{ass}
0.60 A	10.154 s	10.443 s	0.289 s	2.9 %	P_{ass}
0.63 A	8.192 s	8.404 s	0.211 s	2.6 %	P_{ass}
0.65 A	7.232 s	7.403 s	0.171 s	2.4 %	P_{ass}
0.68 A	6.155 s	6.294 s	0.139 s	2.3 %	P_{ass}
0.71 A	5.383 s	5.484 s	0.102 s	1.9 %	P_{ass}
0.75 A	4.659 s	4.734 s	0.074 s	1.6 %	P_{ass}
0.78 A	4.265 s	4.324 s	0.059 s	1.4 %	P_{ass}
0.81 A	3.953 s	4.004 s	0.051 s	1.3 %	P_{ass}
0.85 A	3.620 s	3.665 s	0.044 s	1.2 %	P_{ass}
0.90 A	3.289 s	3.334 s	0.045 s	1.4 %	P_{ass}
0.95 A	3.015 s	3.055 s	0.040 s	1.3 %	P_{ass}
0.99 A	2.822 s	2.855 s	0.033 s	1.2 %	P_{ass}
1.05 A	2.563 s	2.585 s	0.022 s	0.9 %	P_{ass}
1.11 A	2.333 s	2.365 s	0.032 s	1.4 %	P_{ass}
1.21 A	2.003 s	2.025 s	0.022 s	1.1 %	P_{ass}
1.30 A	1.756 s	1.775 s	0.019 s	1.1 %	P_{ass}
1.53 A	1.299 s	1.315 s	0.016 s	1.2 %	P_{ass}
1.69 A	1.087 s	1.094 s	0.007 s	0.6 %	P_{ass}
1.86 A	0.923 s	0.935 s	0.011 s	1.2 %	P_{ass}
2.02 A	0.805 s	0.814 s	0.009 s	1.1 %	P_{ass}
2.24 A	0.678 s	0.684 s	0.006 s	0.9 %	P_{ass}

图 6 测试输出及结果

测试结果会在每个测试文件中显示保存，同时会自动存入一个专门记录测试结果的 Excel 文件中，方便检查。EA

(收稿日期：2020.11.08)