

# 基于贝瑞隆模型的 ATP 仿真误差分析

余洪, 文明浩

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 用 ATP 仿真程序验证基于贝瑞隆模型的纵差保护方案过程中遇到了几个问题, 主要包括: 模型分段问题; 空间模量和零模量传播时间不一致情况下如何获得精确采样数据; 故障初始点产生的误差。研究表明, 问题一对仿真影响不大, 问题三可采用延时的方法解决。对于问题二, 提出了用不同起始时刻的两次仿真获得精确采样数据的方法。仿真结果表明这些措施是可行的, 类似的方法也可以用于其它的保护方案仿真分析中。

**关键词:** 线路保护; 贝瑞隆模型; ATP 仿真; 差动保护; 误差分析

## Error analysis of ATP simulation based on Bergeron model

YU Hong, WEN Ming-hao

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper uses ATP simulation program to confirm the current differential protection based on Bergeron model. The result of simulation is different from the theoretical result. This paper analyzes the source of these errors i.e. the error of the model, the error of sampling, and the error of the first fault data. Then it gives some suggestions to reduce them. The first error has no affection to the results and can delay the first fault data to solve the third error. But the second error is difficult. This paper gives two sampling data that can reduce this error. Simulation results show that the analysis is correct and this method can be used for other simulation analysis.

**Key words:** line protection; Bergeron model; ATP simulation; differential protection; error analysis

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)04-0014-04

## 0 引言

由 Bergeron 提出的贝瑞隆模型<sup>[1]</sup>是一种比较精确的输电线路模型, 它反映了当线路正常运行和外部故障时计算值和实测值之间无差别; 而当内部故障时, 相当于在故障点增加一个节点, 这种关系被破坏, 计算值和实测值就不相等。但是在用 ATP 进行暂态仿真过程中, 由于种种误差的原因, 线路正常情况和外部故障时, 计算值和实测值并不相等, 差值还可能很大, 这样就不能准确地验证保护判据的可行性和灵敏性<sup>[2,3]</sup>。

## 1 贝瑞隆模型原理简介<sup>[4,5]</sup>

现在的超高压输电一般都采用分裂导线, 而这样使每条线路产生耦合, 经过相模变换后得到的每一模分量都满足图 1 所示的贝瑞隆模型。

$$\text{其中 } Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, Z = Z_0 + R/4, h = \frac{Z_0 - R/4}{Z_0 + R/4}, t_0 = l \sqrt{L_0 C_0}$$

$$I_m(t-t_0) = -\frac{1-h}{2} \left[ \frac{U_m(t-t_0)}{Z} + hI_m(t-t_0) \right] - \frac{1+h}{2} \left[ \frac{U_m(t-t_0)}{Z} + hI_m(t-t_0) \right] \quad (1)$$

$$I_n(t-t_0) = -\frac{1-h}{2} \left[ \frac{U_n(t-t_0)}{Z} + hI_n(t-t_0) \right] - \frac{1+h}{2} \left[ \frac{U_n(t-t_0)}{Z} + hI_n(t-t_0) \right] \quad (2)$$

$$I_m(t) = \frac{U_m(t)}{Z} + I_m(t-t_0) \quad (3)$$

$$I_n(t) = \frac{U_n(t)}{Z} + I_n(t-t_0) \quad (4)$$

式中:  $L_0$  和  $C_0$  为模量上线路每公里电感和电容,  $R$  为模量上线路全长电阻,  $Z_0$  为无损线波阻抗,  $Z$  为近似考虑线路损耗后的波阻抗,  $l(\text{km})$  为线路长度,  $t_0$  为模量上波在线路上的传播时间;  $U_m$  和  $U_n$  分别为模量上线路两侧电压;  $I_m$  和  $I_n$  分别为模量上线路两侧电流。根据式(3)、式(4), 可以用  $t$  时刻的模量, 计算出  $t-t_0$  时刻的模量, 再经过模相变换后就可以通过和  $t-t_0$  时刻的采样值比较来判断本线路是否

发生故障,正常情况和外部故障时这两个值是相等的,而发生内部故障时,由于贝瑞隆模型被破坏,上面的比较值就不相等,说明线路发生内部故障。

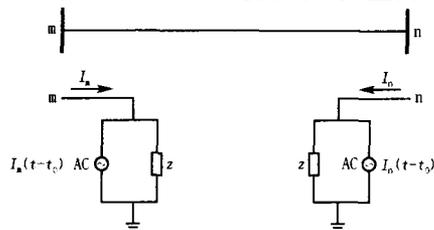


图1 输电线贝瑞隆等值计算电路

Fig.1 Bergeron equivalent calculating circuit of transmission lines

## 2 误差来源分析

误差来源有很多,在进行仿真计算时主要来自于建模时产生的误差以及在进行仿真数据处理时所产生的一些误差。

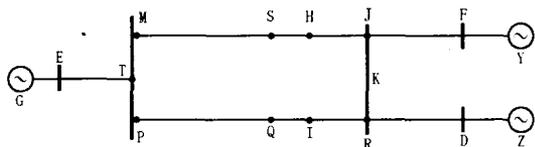


图2 系统仿真图

Fig.2 Simulation system

建立图2所示的ATP模型,以M—S段线路为对象说明。

M—S为一段300 km的分布参数电路,T—M,S—H为一段集中参数电路,当把M—S看作一整段线路时,根据ATP仿真的基本原理,运用公式(3)、(4)比较 $t \sim t_0$ 时刻和其对应 $t$ 时刻的值,发现在正常情况下两者的相量差的模值为1 A左右,外部故障时为4 A左右。但是在实际仿真过程中还需要考虑内部故障,因此就需要把M—S进行分段,这样反映到贝瑞隆等值计算电路中就是几段图1所示的等值电路的串联,由此在用 $t \sim t_0$ 时刻的量推导 $t$ 时刻量的时候就产生误差,仿真结果表明,分段后,正常情况下两者相量差的模值为4 A左右,外部故障时为8 A左右。由于需要考虑内部故障而必须把仿真线路分段考虑,这与基于贝瑞隆原理的仿真模型有差别,由此而产生建模上的误差。

采样时间间隔和采样率紧密相关,用公式(1)、(2)我们可以很直接想到取时间间隔为 $t_0$ ,这样就可以由 $t \sim t_0$ 时刻的值推出 $t$ 时刻的值,但是在刚发生故障时用上面的公式(1)、(2)进行推导就会出现用正常时刻的点推导故障时刻的点,这样的结果肯定有很大差异。

经过相模变换后所获得的模量包括空间模量

和零模量,从图1可知它包括 $Z_0, Z_1, t_0, t_1, h_0, h_1$ ,由于空间模量和零模量传播速度是不相同的,所以在运用公式(1)、(2)从前点推导后点的时候要用到两种采样值,一种是与空间模量相匹配的,另外一种与零模量相匹配,如果采样间隔确定了,那么采样点的位置也就定了,例如:当采用24点采样,那么每点的间隔就是 $20 \text{ ms}/24$ ,而 $t_0, t_1$ 又是与系统参数密切联系在一起的,因此最简单的解决办法就是运用插值,求出零模量和空间模量所需要的采样值,但是这种方法又引入了插值算法中所存在的误差,所以当采样率越高的时候这种算法越精确。

## 3 减小误差方法

对于上面提到的由于故障初始点引起的误差,特别是按照文献[1]中采用傅氏算法进行计算时,它的影响特别明显,从定值差动来看,就是在故障初始时刻出现很大的动作值,这种情况对外部故障有很大影响,它会使外部故障和非故障相发生误动,为防止这种误动只有牺牲判据的灵敏度提高门槛值。即使采用文献[6]中提到的实用判据,而这种判据相当于变相提高了动作的门槛,避免差流对判据的影响。也可以采用以下两种方法,其一是当采用半波傅氏算法时,让判据延时半个周波再动作,这样虽然保证了灵敏度却没体现出保护的速动性;其二是采用傅氏算法,因为这种基于贝瑞隆的差动保护判据不受谐波影响,当采样点时间间隔为 $t_0$ 时,只需要跳过一个采样点就可以解决问题,可以考虑对空间模量和零模量求均值或其他的算法形成关于模量的差动保护判据。

公式(1)~(4)已经列出了关于零模量的推导公式,但是由于空间模量和零模量对应的传播时间 $t_0 \neq t_1$ 。一般情况下 $t_0 > t_1$ ,取 $t_0$ 作为仿真的采样时间间隔,这样获得第一组采样数据,用 $a_n$ 表示( $n=1, 2, 3 \dots$ ), $a_n$ 包括以 $t_0$ 为采样时间间隔的电压和电流,从公式(1)~(4)可知,用第 $n-1$ 点的电压和电流的模量值可以计算出在 $n$ 点的电流模量值,该组数据对应零模量,因此计算出的也是零模量的值,而基于贝瑞隆的差动保护是用测得的第 $n$ 点电流相量与计算得到的第 $n$ 点的电流相量进行比较构成的,为了获得计算后第 $n$ 点的相量值,除了上面公式(1)~(4)用零模量 $a_{n-1}$ 计算出零模量 $a_n$ 外,还需要计算得到第 $n$ 点空间模量,因此就有了第二组采样数据,它仍以时间 $t_0$ 为采样时间间隔,得到的采样数据数据记为 $b_n$ ,第二次采样数据 $b_n$ 在时间上比第一组数据 $a_{n+1}$ 超前 $t_1$ ,如图3所示,

由此就可以用  $n-1$  时刻的空间模量计算得到  $n$  时刻的空间模量, 从而计算出  $t_0+1$  时刻的相量。

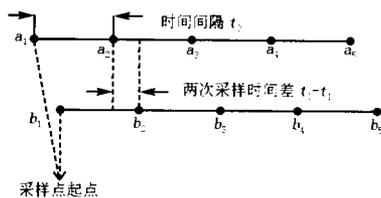


图3 采样点示意图

Fig.3 Sampling sketch map

#### 4 仿真结果对比

如上所述, 为了说明各种情况的误差对仿真结果的影响, 下面以图 2 所示的仿真模型为例, 分别考虑

四种过渡电阻, 在 M-S 段内取 6 种内部故障, 外部取 3 种故障。以 M 端仿真结果为例说明在各种故障情况下上述误差对差动保护的影响。  $I_{ma}$  表示 M 端各相量经半波傅氏算法的模值,  $dI_{ma}$  表示相应相量差的模值。下面两表都采用同一个模型进行仿真, 取两端电源相角差为  $30^\circ$ , 以同一点发生区外金属性故障为例。其中表 1 取一组采样率高的仿真结果, 比较当采用插值算法与采用精确的利用两次仿真数据所得相量差模值在精度上的差异, 其中表 1 左边的数据采用每周波 192 点采样, 通过插值算法计算得到时间间隔为  $t_0$  的模量, 右端采用两次仿真, 采样时间间隔为  $t_0$ ; 另外, 表 2 都采用采样时间间隔为  $t_0$ , 比较跳过故障初始点和不跳过时对相量差模值的影响。

表 1 保护区外 a 相发生金属性接地故障相量差模值比较

Tab.1 Differential current amplitude of fault-phase for external single phase(A) to ground fault

状态	采用插值时的相量差模值		采用两次仿真数据后的相量差模值	
	$dI_{ma}/A$	$I_{ma}/A$	$dI_{ma}/A$	$I_{ma}/A$
故障前	21.67	686.06	16.54	647.16
	21.78	707.27	15.56	626.24
	21.03	721.07	18.35	771.35
故障时刻	37.70	681.50	118.5	585.75
故障后	48.48	1 029.56	9.00	1 331.72
	36.89	1 588.76	17.21	1 593.89
	50.09	1 693.0	5.93	1 578.08
	50.06	1 825.39	29.05	1 808.05
	44.97	1 778.5	23.87	1 843.48
	40.06	1 183.47	20.51	1 258.4

表 2 保护区外 a 相发生金属性接地故障采样间隔  $t_0$  时相量差模值比较

Tab.2 Differential current amplitude of fault-phase for external single phase(A) to ground fault when the sampling time is  $t_0$

状态	采用两次仿真数据后的相量差模值		采用两次仿真跳过故障点相量差模值	
	$dI_{ma}/A$	$I_{ma}/A$	$dI_{ma}/A$	$I_{ma}/A$
故障前	16.54	647.16	16.54	647.16
	15.56	626.24	15.56	626.24
	18.35	771.35	18.35	771.35
故障时刻	118.5	585.75	118.5	585.75
故障后	130.19	755.33	17.57	695.35
	211.34	595.56	16.66	1 012.32
	93.25	268.08	9.00	1 331.72
	70.95	822.64	17.21	1 593.89
	89.65	1 618.22	5.93	1 578.08
	9.00	1 331.72	29.05	1 808.05
	17.21	1 593.89	23.87	1 843.48
	5.93	1 578.08	20.51	1 258.4
	29.05	1 808.05	24.88	803.97
	23.87	1 843.48	7.27	1 095.2
	20.51	1 258.4	1.38	1 424.4
	24.88	803.97	9.09	1 401.77
	7.27	1 095.2	18.76	1 501.3
	1.38	1 424.4	12.17	1 701.98
	9.09	1 401.77	21.86	1 705.63
	18.76	1 501.3	23.53	1 397.02

1)从表 1 可以看出在正常情况下,采用插值的方法所计算出来的结果比采用两次仿真数据所得到的结果要大,说明前一种方法在仿真精度上比后者差;而且故障后,运用第二种方法计算的结果也比前者要好。

2)从表 2 两者的对比可以看出当跳过故障初始点后,相量差模值避过了一段时间较大值,这样可以提高差动判据的灵敏度。

3)从表 1 和表 2 的对比发现,采用延时时间  $t_0$  作为采样点时间间隔时可以提高结果的准确性。这是因为提高采样率之后不能保证延时  $t_0$  后正好处在整点,由此而造成结果出现误差。

4)从比较精确的仿真结果可以看出,基于贝瑞隆模型的差动保护还是可行的。

## 5 结论

本文从两个方面对比分析了一般仿真算法和精确仿真算法对基于贝瑞隆差动保护的影响。从这些分析可以看出,采用一定的方法可以提高 ATP 仿真的精确度,尽量减小了各种误差对仿真结果的影响,这样才能更准确地用仿真实验验证理论方法,并且由改进后的方法所得到的仿真结果也证明了基于贝瑞隆模型的线路差动保护也是可行的。

## 参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,1994.  
HE Jia-li,SONG Cong-ju.Principles of Protective Relaying in Electric Power Systems[M].Beijing:China Electric Power Press,1994.
- [2] 贺家李,李永丽,郭征,等.特高压输电线继电保护配置方

案:(二)保护配置方案[J].电力系统自动化,2002,26(24):1-6.

- HE Jia-li, LI Yong-li, GUO Zheng,et al.Relay Protection for UHV Transmission Lines:Part two Configuration of Relay Protection Systems[J].Automation of Electric Power Systems, 2002,26(24):1-6.
- [3] 贺家李,李永丽,李斌,等.特高压输电线继电保护配置方案:(一)特高压输电线的结构与特点[J].电力系统自动化,2002,26(23):1-6.  
HE Jia-li, LI Yong-li, LI Bin,et al.Relay Protection for UHV Transmission Lines:Part One Construction and Operation Characteristics[J].Automation of Electric Power Systems, 2002,26(23):1-6.
- [4] 郭征,贺家李.输电线纵差保护的新原理[J].电力系统自动化,2004,28(11):5-9.  
GUO Zheng,HE Jia-li.New Principle of Pilot Relay Protection of Transmission Lines[J].Automation of Electric Power Systems, 2004,28(11):5-9.
- [5] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,2004.  
XIA Dao-zhi.The Analysis of Power System[M].Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [6] 郑玉平,吴通华,丁焱,等.基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J].电力系统自动化,2004,28(23):54-59.  
ZHEN Yu-ping,WU Tong-hua, DING Yan,et al.Applied Criterion of Current Differential Protection Based on Bergeron Modal[J].Automation of Electric Power Systems, 2004,28(23):54-59.

收稿日期:2006-09-04; 修回日期:2006-11-06

作者简介:

余洪(1981-),男,硕士研究生,从事超高压线路保护仿真分析; E-mail:yu\_005hust@163.com

文明浩(1973-),男,副教授,从事继电保护研究工作。

## 中俄直流背靠背联网工程将全面开工

2007年1月30日哈尔滨消息,记者近日从黑龙江省电力有限公司了解到,中俄直流背靠背联网工程今年将全面开工,到2008年完工时,俄罗斯远东电网可向黑龙江电网年送电量43亿kWh。该送电量相当于哈尔滨市2006年用电量106亿kWh的41%。

据了解,2006年黑龙江省电力公司投巨资建设了500kV线路190.8km,220kV线路420.2km,新增变电容量42万kVA,网架结构逐步完善。同时,实现了全省国网覆盖区域内“户户通电”目标,解决了黑龙江省1.4万户的用电难题。今年,黑龙江省大中型电网建设投资将达32.5亿元,比2006年的13.8亿元增加一倍还多,这些资金将用于加快主干电网和电源送出工程建设。其中,中俄直流背靠背联网工程今年将全面开工,到2008年工程完成时,通过该工程俄罗斯远东电网可向黑龙江电网年送电量43亿kWh;今年还将建设220kV亚布力输变电工程,以满足2009年世界大学生冬季运动会的供电需求。