

基于 MODELS 的工频弧光接地过电压的仿真

金恩淑¹, 杨明芳¹, 李卫刚², 陈 韬¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林省电力有限公司通化供电公司, 吉林 通化 134001)

摘要: 弧光接地过电压是中性点不接地系统中危害最大的过电压之一。目前, 关于弧光接地过电压的研究大都采用系统仿真, 基于工频熄弧理论, 通过控制开关的闭合来模拟电弧的熄灭和重燃, 观察弧光接地过电压情况。由于电弧的熄灭和重燃具有强烈的统计特性, 电弧不一定是在工频过零时熄灭, 也不一定是在电压达到最大值时重燃。因此, 按一个工频周期来设定开关的开闭时间模拟弧光接地过电压时, 模型不够准确。鉴于这种情况, 在对弧光接地过电压产生机理深入研究的基础上, 提出了一种新的开关控制方法, 采用 EMTP 中的控制系统暂态分析 TACS 模块和 MODELS 模块对开关的控制部分进行处理。运用 MODELS 模块中特定的 MODELS 语言编写控制程序, 输出一个信号作为 TACS 开关的输入控制信号, 当满足给定电压和电流阈值时, 开关便会相应地闭合及断开。不必按一个工频周期来设定开关的开闭时间, 提高了仿真模型的精确性。将其应用于 10 kV 中性点不接地系统和小电阻接地系统的弧光接地过电压的研究, 取得了预期效果, 具有很好的应用前景。

关键词: 弧光接地过电压; 中性点不接地; 小电阻接地; TACS; MODELS

Simulation of PF arc grounding over-voltage based on MODELS

JIN En-shu¹, YANG Ming-fang¹, LI Wei-gang², CHEN Tao¹

(1. Electrical Engineering College, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
2. Jilin Power Electric Co. Ltd Tonghua Power Supply Company, Tonghua 134001, China)

Abstract: The arc grounding voltage is one of the worst over-voltages in the non-ground neutral system. At present, system simulation is the main method about the study on the arc grounding over-voltage. Based on the power frequency (PF) arc blowout theory, arc quenching and rekindles are simulated by controlling the switch on or off to observe the situation of arc grounding over-voltage. MATLAB power system simulation toolbox and electromagnetic transient simulation software EMTP is mainly used as the simulation tool. There is a common characteristic when using the two softwares to simulate arc quenching and rekindles, the moment of switch opening and closing is set according to one power frequency period. As a matter of fact, the arc is not sure to extinguish at the moment of PF current passing zero, the arc is also not sure to rekindle at the fault phase coming to the maximum recovery voltage because of intense statistics property of arc occurring. For this reason, the simulation model based on the theory of power frequency arc-blowout theory is not accurate. In such a case, based on the intensive study on mechanism of production of arc grounding voltage, a new method is proposed in this paper. Transient analysis of control system TACS module and MODELS module of EMTP is employed to dispose of the controlling section. The controlling program is compiled by the special language of MODELS module. The output signal of MODELS module is as the input controlling signal of TACS switch. When the voltage and current meet the threshold value, the switch will be on or off correspondingly. It is not necessary to set the opening or closing time according to a power frequency cycle, simple and flexible, improving the accuracy of simulation model. When it is applied to the arc grounding over-voltage study in 10 kV non-ground neutral system and system grounded by small resistance, a good expected result is got, having a better prospect.

Key words: arc grounding over-voltage; non-ground neutral system; small resistance; TACS; MODELS

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0024-05

0 引言

中性点不接地系统单相接地故障时可以带故障运行 1~2 小时, 具有较高的系统可靠性。因此, 我国 66 kV 及以下系统普遍采用中性点不接地方式。随着城市中配电网规模的扩大和农网改造的进行,

采用的电缆线路逐渐增多, 电容电流也随之增大。这时系统发生单相接地时电弧往往不能自熄, 产生弧光接地过电压。由于这种过电压持续时间长, 波及范围广, 对系统中的绝缘薄弱环节危害较大, 因而引起了广泛关注^[1~3]。关于弧光接地过电压的产生机理及发展过程, 前人已作了大量研究。主要形成

了高频熄弧、工频熄弧和介电强度恢复三种理论^[4]。目前关于弧光接地过电压所做的大量研究和仿真大都是在工频熄弧理论上进行的。认为每隔一个工频周期电弧就会熄灭和重燃一次,并且假定电弧在工频电流过零时熄灭,达到最大恢复电压时重燃^[4-10]。实际上,由于受大气条件和燃弧部位介质的影响,电弧的熄灭和重燃具有很强的随机性质,相应的过电压倍数也具有统计性质。因此,在采用仿真的手段研究弧光接地过电压时,开关的开闭时间的设定是否准确,直接影响到仿真模型的精度,进而影响到弧光接地过电压倍数。文献[6~10]中开关采时间控制,仿真模型没有考虑电弧熄灭和重燃的随机性,并且对各种不同情况进行仿真时,熄弧和燃弧时刻每次都需重新设定,比较复杂。本文采用了电磁暂态仿真软件EMTP中的控制系统暂态分析TACS模块和MODELS模块对开关的控制部分进行处理,简单灵活,提高了模型的准确性,为弧光接地过电压的进一步研究奠定了基础。

1 弧光接地过电压的产生机理

中性点不接地系统发生单相接地时,流过故障点的电流是非故障相的电容电流之和。当该电流在几安或几百安的范围时,电弧往往不能自熄,但由于接地电流又不是很大,电弧不能持续燃烧,于是便形成了电弧熄灭与重燃间隔发生的不稳定状态,从而在故障相和非故障相上产生严重的过电压,称为弧光接地过电压。

弧光接地过电压的发展过程极其复杂,主要有三种理论。正如文献[4]所指出的,工频熄弧理论和高频熄弧理论均将电弧接地看作金属接地,认为弧道电阻为零,不管是高频振荡电流过零还是工频电流过零熄弧后,故障点的介质强度必然瞬间恢复到能够耐受恢复电压的强度,并且假定单相接地在相电压达到最大值时发生。介电强度恢复理论则认为,单相接地电弧的熄灭和重燃,和流过故障点的电流特性密切相关。

2 基于 MODELS 的工频弧光接地过电压的仿真控制模型

针对用时间控制开关模型的不准确性,本文提出了一种新的控制方法,采用MODELS语言编程,根据电压、电流量来控制开关。下面将对MODELS的使用方法给出简单介绍。

2.1 MODELS 简介

控制系统可以通过电磁暂态仿真软件EMTP中的TACS或MODELS模块来模拟。TACS一般用于

模拟简单的控制系统。MODELS是一种通用的算法仿真工具,比TACS更加强大,灵活并且极具新颖性。它具有自己特定的语言,通过编写算法来实现控制功能,通常用来仿真较复杂的控制系统,并且支持模块分解。它和EMTP的接口与TACS和EMTP的接口是一致的。从EMTP仿真电路中取得信号(电压、电流、开关状态等)作为MODELS算法的输入,MODELS模块的输出作为控制信号,对仿真系统中电气元件实施控制。

MODELS语法支持通过组合、顺序、并发、选择、循环和复制对系统进行准确模拟。用于控制系统动作的功能模块可以用编程语言实现。一个被仿真的系统可以由相互联系的子模块构成,但在每个子模块的内部描述和独立仿真中模块之间是相互独立的。每个模块既可以单独使用也可以在仿真系统时被其它模块调用。三种初始化方法相互配合,通过给模块的输入和变量赋初值,对模块进行初始化。仿真过程中输入、变量值和模型结构可以动态修改。

2.2 基于 MODELS 的弧光接地过电压的仿真控制模型

当模型用于控制功能的连接时,每一次应用都必须在MODELS部分的USE语句中进行定义。在仿真时刻 t 从电路中测得输入量,输出值作为控制信号在仿真时刻 $t+\text{timestep}$ 传递给电路。每个控制型模块都必须提供一个USE语句,USE语句定义了模块的输入、输出、数据及使用指针,以决定使用该模块时的动作行为。USE语句按data case中出现的顺序依次被ATP调用。输入、输出及所用变量名都必须在MODELS部分提前声明。在模型的控制语句执行之前,必须首先对程序进行初始化。即对程序中用到的变量及历史函数等赋初值。初始化在模型的INIT部分进行,具体格式为INIT statement-list ENDINIT。以关键词INIT引导,然后是具体的初始化语句,包括MODELS语言中定义的各种赋值语句及控制语句等,最后以EMDINIT作为初始化完成的标志。

像Matlab等编成语言一样,MODELS同样具有控制语句,如条件选择语句IF,循环语句WHILE、FOR等,用法与其它语言相似。可以根据仿真程序需要,合理使用,这也是MODELS比TACS灵活之处。

本文中采用了TACS和MODELS相结合的方法,实现对开关的控制,以模拟电弧的熄灭和重燃。以下是本文所用算法的流程图。

当A相电压达到最大值时,MODELS输出一个控制信号TRIP,使TACS开关闭合,模拟系统发生单相接地;给出一个门槛电流,当A相电流小于

门槛值时,控制 TACS 开关断开,模拟电弧熄灭;给出一个门槛电压,当故障相恢复电压大于门槛值时,控制 TACS 开关闭合,模拟电弧重燃。

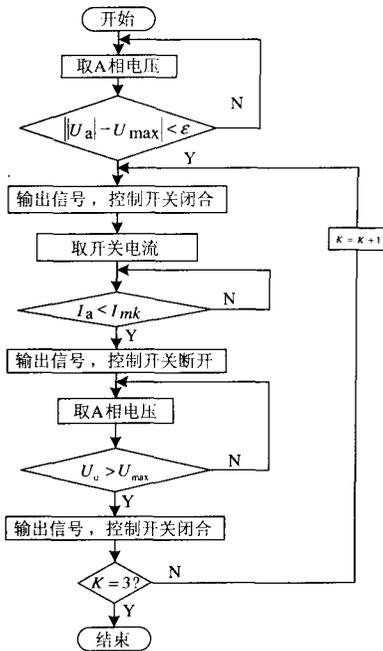


图 1 MODELS 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow-chart of MODELS

3 基于 MODELS 的弧光接地过电压的仿真结果

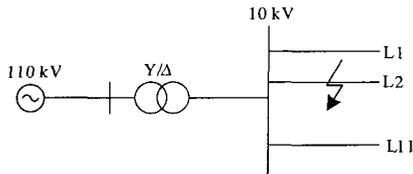


图 2 10 kV 系统仿真接线图

Fig.2 Connection diagram of 10 kV system

图 2 为本文采用的某变电站的 10 kV 系统接线图。该变电站 10 kV 侧采用单母三分段。为简单起见,本文事例都是对 I 段进行的仿真。利用 ATP 搭建系统模型,线路采用分布参数模块, I 段共有 11 条电缆出线。其中 110 kV 高压线路用一个 110 kV 三相电源代替,三相变压器用三个单相理想变压器模拟。负荷侧采用 Y 接。本文也假定电缆线路 L2 出口处 A 相在电压达到负最大值时发生单相接地,并且工频电流过零时熄弧。

3.1 中性点不接地系统弧光过电压仿真结果

事例 1:其他情况不变,接地点过渡电阻为 1 Ω,故障相恢复电压不同时,故障点和母线处的弧光过电压情况。

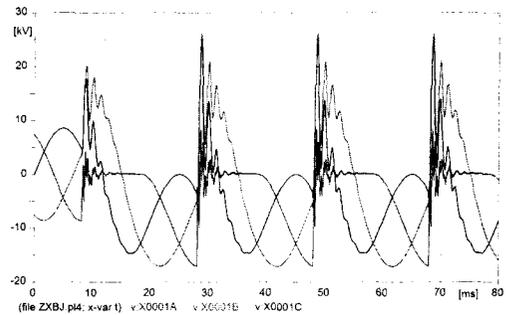


图 3 故障相恢复电压为最大值时的弧光接地过电压波形

Fig.3 Arc grounding overvoltage wave with fault phase voltage coming to the maximum in non-ground neutral system

图 3 为中性点不接地系统故障相恢复电压为最大值时的弧光接地过电压波形。由图可知,当故障相恢复电压为负的最大值时,故障点和母线处都出现了非常高的过电压。

表 1 故障相恢复电压对过电压倍数的影响

Tab.1 Influence of different recover voltage of fault phase on the amplitude of overvoltage

故障相恢复电压	母线电压			故障点电压		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
U_{max}	1.991	3.059	2.881	1.984	3.358	3.145
$0.95U_{max}$	1.892	2.642	3.054	1.884	2.940	3.317
$0.9U_{max}$	1.794	2.326	3.036	1.785	2.315	3.29
$0.85U_{max}$	1.701	2.048	2.969	1.692	2.324	3.218

表 1 为故障相恢复电压不同对过电压倍数的影响。由于受多种因素影响,弧光接地过电压的产生具有随机性质,不一定非得在故障相达到最大值时发生。由表 1 可以看出,故障相恢复电压越接近最大值,故障相和健康相弧光过电压倍数越大。当故障相恢复电压达到最大值时,出现的过电压最严重,过电压倍数最高可达 3.358 P.U。

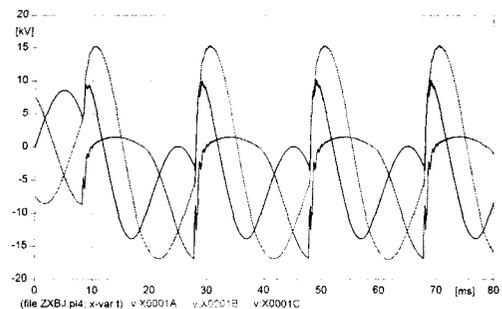


图 4 过渡电阻为 10 Ω 时的弧光接地过电压波形
Fig.4 Arc grounding overvoltage wave with transition resistance 10 Ω in non-ground neutral system

事例 2: 其他情况不变, 故障相为最大恢复电压, 接地点过渡电阻不同时, 故障点和母线处的弧光过电压情况。

图 4 为中性点不接地系统过渡电阻为 $10\ \Omega$ 时的弧光接地过电压波形。由于受接地点过渡电阻的影响, 故障点三相电压波形畸变程度减轻。

表 2 过渡电阻不同对过电压倍数的影响

Tab.2 Influence of different transition resistance on the amplitude of overvoltage

过渡电阻 Ω	母线电压			故障点电压		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0	2.045	3.363	2.910	2.038	3.764	3.309
0.5	1.933	3.113	3.258	1.925	3.534	3.645
1	1.991	3.059	2.863	1.984	3.348	3.127
5	1.974	1.991	1.679	1.967	2.026	1.675
10	1.967	1.980	1.631	1.960	1.975	1.619

表 2 给出了过渡电阻不同对过电压倍数的影响。由下图可以看出, 过渡电阻对弧光接地过电压的大小影响较大, 随着过渡电阻的增加, 故障点和母线处各相的过电压倍数逐渐减少, 当发生金属性接地时, 出现的过电压最严重, 过电压倍数最高可达 3.764 P.U。

3.2 小电阻接地系统弧光过电压仿真结果

事例 1: 其他情况不变, 故障相为最大恢复电压, 中性点接地电阻为 $10\ \Omega$, 接地点过渡电阻不同时, 故障点、母线处及中性点的弧光过电压情况。

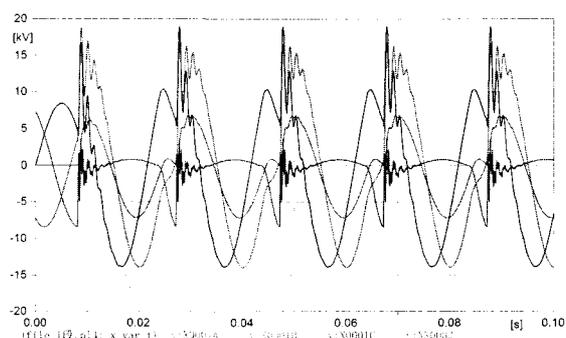


图 5 中性点接地电阻为 $10\ \Omega$ 弧光接地过电压波形
Fig.5 Arc grounding overvoltage wave with grounding resistance $10\ \Omega$ in non-ground neutral system

图 5 为中性点接地电阻为 $10\ \Omega$ 弧光接地过电压波形。从图中可以看出, 中性点经小电阻接地后, 故障点、母线处及中性点的弧光过电压明显减小。

表 3 为过渡电阻不同对过电压倍数的影响。由表 3 可以看出, 小电阻接地系统中, 当中性点接地

电阻一定时, 过渡电阻对弧光接地过电压影响较大。随着过渡电阻的增大, 故障点、母线处及中性点的弧光过电压逐渐减小。

表 3 过渡电阻不同对过电压倍数的影响

Tab.3 Influence of different transition resistance on the amplitude of overvoltage

过渡电阻 Ω	母线电压			故障点电压			
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	中性点电压
0.5	0.987	2.448	2.372	0.974	2.593	2.585	0.862
1	0.981	3.059	2.881	0.974	2.330	2.309	0.791
5	0.985	1.587	1.585	0.974	1.590	1.597	0.630
10	0.980	1.416	1.217	0.974	1.410	1.336	0.483

事例 2: 其他情况不变, 故障相为最大恢复电压, 接地点过渡电阻为 $10\ \Omega$, 中性点电阻不同时, 故障点、母线处及中性点的弧光过电压情况。

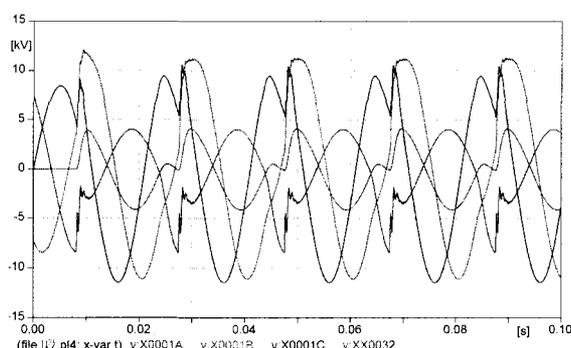


图 6 过渡电阻为 $10\ \Omega$ 时的弧光接地过电压波形
Fig.6 Arc grounding overvoltage wave with transition resistance $10\ \Omega$ in system grounded by small resistance

图 6 为过渡电阻为 $10\ \Omega$ 时的弧光接地过电压波形。将图 6 与图 4 进行比较, 很明显地看出, 经小电阻接地系统弧光接地倍数显著减小。

表 4 中性点电阻不同对过电压倍数的影响

Tab.4 Influence of different grounding resistance on the amplitude of overvoltage

接地电阻 Ω	母线电压			故障点电压			
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	中性点电压
8	0.987	2.186	2.239	0.974	2.325	2.353	0.792
10	0.982	2.190	2.205	0.974	2.330	2.309	0.833
16	0.981	2.200	2.149	0.974	2.342	2.129	0.893
50	0.987	2.239	2.216	0.940	2.386	2.338	1.241

表 4 为中性点电阻不同对过电压倍数的影响。过渡电阻一定, 中性点接地电阻对弧光过电压倍数影响较大。接地电阻越大, 过电压倍数越大。

4 结论

本文对中性点不接地系统中弧光接地过电压现象进行了仿真研究。针对以往仿真时, 利用时间控制开关模型不够准确的特点, 提出了一种新的开关控制方法。利用 EMTP 中的 MODELS 控制系统算法语言, 通过编程实现对开关的控制。由于算法较灵活, 利用系统中的电压、电流作为判别电弧熄灭和重燃的条件, 而不必局限于一个工频周期的时间假定, 提高了仿真模型的精度, 更接近于真实情况, 为进一步研究弧光接地过电压奠定了基础。

参考文献

[1] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1988.

[2] 陈维贤. 电力系统内部过电压[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.

[3] 平绍勋. 电力系统内部过电压保护及实例分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.

[4] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.

[5] 张作琴, 李敬兆. 电力系统弧光接地保护的研究[J]. 电力科学与工程, 2002, (4).
ZHANG Zuo-qin, LI Jing-zhao. Study of Arc Grounding Protection of Power System [J]. Electric Power Science and Engineering, 2002, (4).

[6] 汤新光, 杜庆斌. 低压配电网中性点接地方式的仿真[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(3):27-30.
TANG Xin-guang, DU Qing-bin. Simulation of the Low-voltage Distribution Network Neutral Grounding Mode [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(3):

27-30.

[7] 靳晓东, 李谦, 王晓瑜, 等. 配电网弧光接地过电压的仿真及分析[J]. 高电压技术, 1994, 20(3):71-75.
JIN Xiao-dong, LI Qian, WANG Xiao-yu, et al. Simulation and Analysis Arc Grounding Over-voltage in Distribution Network [J]. High Voltage Technology, 1994, 20(3): 71-75.

[8] 刘连睿. 10~35kV 系统弧光接地过电压的危害及解决办法[J]. 华北电力技术, 1999, (3).
LIU Lian-rui. Hazards and Solutions Arc Grounding Over-voltage of 10 ~ 35 kV System[J]. North China Electric Power Technology, 1999, (3).

[9] 高亚栋, 杜斌, 赵峰, 等. 中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 345-348.
GAO Ya-dong, DU Bin, ZHAO Feng, et al. Study of Arc Grounding Over-voltage in Neutral Grounding by Small Resistance of Distribution Network [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2004, 40(5): 345-348.

[10] 陈先禄, 田凤兰, 许文强, 等. 非线性电阻限制 10kV 电网弧光接地过电压分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(7):38-40.
CHEN Xian-lu, TIAN Feng-lan, XU Wen-qiang, et al. Analysis of Arc Grounding Over-voltage Limited by Non-linear Resistance in 10kV Power System[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(7):38-40.

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-09-22

作者简介:

金恩淑(1972-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护的研究;

杨明芳(1981-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: mfhero@163.com

李卫刚(1980-), 男, 研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[17] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Reactive Power Optimization Under Voltage Constraints Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 1-4.

[18] Overbye T J, Dobson I. Q-V Curve Interpretations of Energy Measures for Voltage Security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 19(1): 331-337.

[19] DeMarco C L, Overbye T J. An Energy Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 419-425.

[20] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 29-35.
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Reactive Power Margin Estimation by the View of the Heuristic Energy Function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 29-35.

收稿日期: 2008-10-15; 修回日期: 2009-06-11

作者简介:

杨琪(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: qwertins@163.com

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究。