

## 3/2 接线高压输电线路的建模与仿真

刘宝林<sup>1</sup>, 范磊<sup>2</sup>, 杨毅<sup>3</sup>

(1. 昆明供电局, 云南 昆明 650011; 2. 云南送变电工程公司, 云南 昆明 650216;  
3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 超高压输电线路接线方式上大多采用 3/2 接线, 设计运行此种接线方式必须对各种线路的故障过程给予足够的重视。文章利用 Matlab 软件中 Simulink library 提供的 SimPowerSystems 工具箱, 对 3/2 接线高压输电线路建立模型, 并结合实际工作经验, 以输电线路中发生 A 相永久接地故障这一过程为算例进行仿真, 并对仿真结果进行分析; 同时, 此模型对线路故障的各种类型均能做出仿真分析。

**关键词:** 电力系统; 3/2 接线; Matlab; 线路故障; 仿真

### Modeling and simulation of high voltage transmission line about 3/2 connection

LIU Bao-lin<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>2</sup>, YANG Yi<sup>3</sup>

(1. Kunming Electric Power Supply Bureau, Kunming 650011, China; 2. Yunnan Electric Power Transmission and Transformation Company Co.,Ltd, Kunming 650216, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

**Abstract:** 3/2 connection is widely applied in high voltage transmission line, and special attention should be paid when designing and operating such connection. The paper introduces a method about modeling a high voltage transmission line, and provides the simulation of a fault between phase A and the ground based on the Simulink library toolbox provided by MATLAB as well as the practical work experience. At the same time, the model can simulate and analyse all kinds of fault about transmission line.

**Key words:** power system; 3/2 connection; MATLAB; transmission line fault; simulation

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)24-0038-03

## 0 引言

在变电运行工作中, 出现故障情况较多的就是输电线路故障, 尤其是在雷雨天气。而实际运行经验表明, 高压输电线路中绝大多数的故障是瞬时性的, 永久性故障一般不到 10%<sup>[1]</sup>, 因此, 在 500 kV 高压输电线路一般都配置了自动重合闸装置。在正常运行方式下, 重合闸运行方式为单重, 即单相故障, 跳单相重合单相, 重合于永久故障跳三相; 相间故障三相跳开后不重合。本文利用 Matlab 软件, 对 3/2 接线高压输电线路进行建模, 并以变电运行工作的实际情况为依据, 再现了高压输电线路出现单相永久接地故障重合闸动作这一完整的过程。同时, 此模型具备仿真各种线路故障的功能, 并可根据需要设置线路的长短和故障点的位置。仿真结果表明, 通过各断路器时间上的配合, 可实现与变电运行工作中真实一致的动作过程, 并可设计运行

此类工程提供一个借鉴。

## 1 高压输电线路模型建立

3/2 接线是 500 kV 超高压系统中较常采用的一种接线形式, 在此种方式中, 每个回路中连接着两台断路器, 中间的一台断路器也连接着两个回路。正常运行时, 两组母线和全部断路器都闭合, 形成多环供电。它具有很高的供电可靠性和运行调度灵活性。即使母线发生故障, 也只跳开与此母线相连的所有断路器, 任何回路均不停电; 在检修任何断路器时都可不停与之有关的单元<sup>[2]</sup>。

在利用 Matlab 建立此线路模型时, 首先要将一条实际的输电线路转化成其等值电路图, 在 Matlab 中, 用具有元件特征的模块来代表各电气元件, 本高压输电线路模型包括以下几个模块: 母线模块、断路器模块、阻波器模块、避雷器模块、并联高压电抗器模块、负载模块。在进行建模仿真时, 以下

几个方面是比较重要的, 直接关系到仿真的结果。

(1)建立正确的输电线路等值电路图, 此电路图应能反映实际高压输电线路的电气特征; (2)各电气模块元件参数的设置, 应能和实际运行的电气设备参数一致; (3)出现故障过程中, 继电保护动作各断路器

时间参数的配合。在此模型中, 母线模块、输电线路模块均采用的是子系统, 在正常运行方式下, 母线模块中输出电压维持恒定的  $U_n=532\text{ kV}$ ; 高压输电线路部分模型参数如表 1 所示。

表1 输电线路模型参数

Tab.1 Parameters of the transmission line model

母线模块参数		$\pi$ 形输电线路参数		高抗参数	中性点电抗器	负载模块
电压源	$Z_{eq}$	正序	零序	$U_n=525\text{ kV}$	$U_n=220\text{ kV}$	$U_n=525\text{ kV}$
$U_n=395\text{ kV}$	$R=12\ \Omega$	$R=0.01273\ \Omega$	$R=0.3864$	$f=50\text{ Hz}$	$f=50\text{ Hz}$	$f=50\text{ Hz}$
$R=0.001\ \Omega$	$X=1\text{ H}$	$X=0.9337 \times 10^{-3}\text{ H}$	$X=4.1264 \times 10^{-3}\text{ H}$	$P=0$	$P=0$	$P=500\text{ MW}$
$X=0.15\text{ H}$	$C=inf$	$C=12.74 \times 10^{-9}\text{ F}$	$C=7.751 \times 10^{-9}\text{ F}$	$Q=40\text{ Mvar}$	$Q=128\text{ kvar}$	$\cos\phi=0.99$

母线模块子系统如图1所示, 它是根据3/2的接线形式, 利用双电源来模拟出线两侧的母线情况;  $Z_{eq}$ 为高压线路输入端的等值内阻; 输电线路采用的是Matlab软件提供的  $\pi$  形等效模型; 阻波器模块是利用电容器和电抗器的并联谐振来实现的, 对于工频信号相当于短路, 对于高频信号相当于开路, 设计工作频率为  $f=200\text{ kHz}$ ; 带有阻波器的高压输电线路子系统如图2所示。

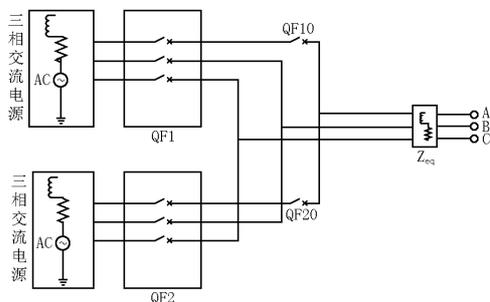


图1 母线模块子系统

Fig.1 Subsystem of bus block

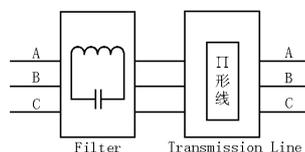


图2 输电线路子系统

Fig.2 Subsystem of transmission line

线路的通过功率为  $500\text{ MW}$ , 功率因数为  $0.99$ 。高压输电线路模型如图 3 所示。在仿真过程中, 设置仿真的停止时间为  $0.2\text{ s}$ , 仿真求解器为  $ode23\text{ s}$ , 可变步长, 相对误差为  $0.001$ , 其他参数设置为 (auto)。

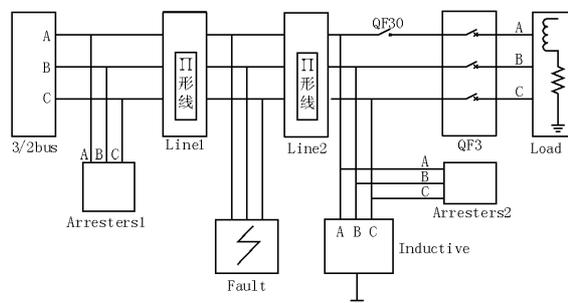


图3 高压输电线路模型

Fig.3 High voltage transmission line model

## 2 单相接地故障仿真分析

通过建立此模型, 来对超高压输电线路发生 A 相永久接地故障整个过程进行仿真, 以单相断路器的断开与合上来实现断路器的单重功能; 用三相断路器的断开来实现重合于永久故障后三相跳闸功能。为保证结果的准确性, 单相断路器的内阻设置必须相当小, 这样在正常运行方式下其对输出电压的影响是可以忽略的。整个故障过程中断路器的动作时间如表 1 所示。其中, H 代表断路器处于合位; F 代表断路器处于分位。

表2 断路器的动作时序

Tab.2 Operation time sequence of the circuit breakers

断路器	20 ms	40 ms	100 ms	120 ms	130 ms
QF1	H	H	H	H	F
QF10	H	F	H	H	H
QF2	H	H	H	H	F
QF20	H	F	F	H	H
QF3	H	H	H	H	F
QF30	H	F	H	H	H

动作时序说明: 在  $20\text{ ms}$  时, 输电线路中发生

了 A 相单相接地故障，此时保护动作，使得两侧断路器 A 相跳闸切除故障；重合闸动作重合于永久故障，线路两侧断路器三相跳闸切除故障。

单相接地故障前后，母线模块输出电流如图 4 所示。

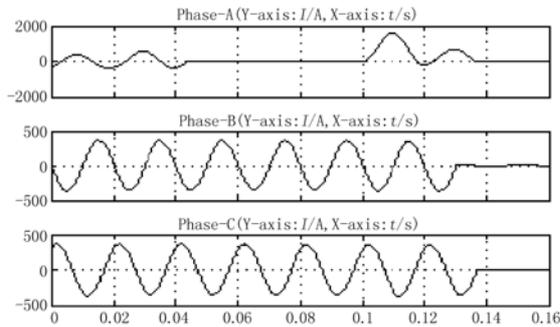


图4 母线模块输出电流

Fig.4 Output current waveforms of the bus block

在图4中，20 ms前，输电线路处于正常的运行方式下，母线模块输出的三相电流为366.52 A；20 ms时，A相接地，A相电流波形稍有畸变，电流幅值增大为578 A；40 ms时，线路两端的断路器A相跳闸，此时A相电流变为零，B、C两相电流不变；100 ms、120 ms表现的是断路器的单重功能，且为“先边后中”的方式，此时重合在永久接地故障上。在100 ms时，由于只是QF10重合，QF20还处于断开位置，此时 I 母合闸于故障点，由于测量的只是 I 母输出电流，所以此时的短路电流较故障发生时大；120 ms时，两侧断路器都重合上，在130 ms时，两侧断路器三跳切除故障，母线模块的输出电流变成了零。这与实际的故障过程是一致的。

发生 A 相接地故障时，负载侧的 A 相电流就变得相当小；当线路两侧断路器 A 相跳闸切除故障后，A 相电流变成了零；三相跳闸后，负载电流经过一个暂态过程后减小为零。负载电流如图 5 所示。

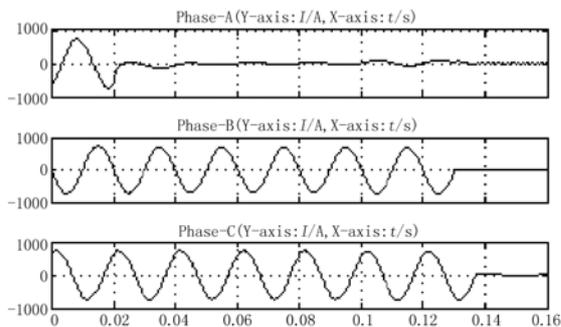


图5 负载电流

Fig.5 Current waveforms of the load

在发生A相接地故障后，列出A相接地的边界条件：

$$U_{f(1)} + U_{f(2)} + U_{f(0)} = 0$$

$$I_{f(1)} = I_{f(2)} = I_{f(0)}$$
(1)

通过复合序网解得故障处的正序、负序、零序电流为：

$$I_{f(1)} = I_{f(2)} = I_{f(0)} = \frac{U_{f|0}}{Z_{\Sigma(1)} + Z_{\Sigma(2)} + Z_{\Sigma(0)}} \quad (2)$$

由计算可知，在单相接地故障中，故障点的正序、负序和零序电流相等<sup>[3]</sup>。这与图 6 的仿真结果是一致的。故障点正序、负序和零序电流波形如图 6 所示。

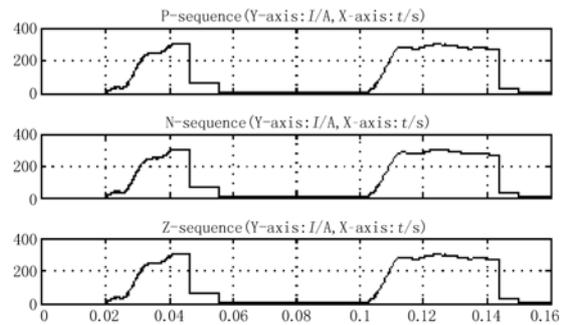


图6 故障点正序、负序和零序电流波形

Fig.6 Positive, negative and zero sequence wave of the fault block

### 3 结论

此高压输电模型是依照实际变电运行中的参数而建立的，通过对高压输电线路的仿真分析，能更深入地理解系统的运行特征，对以后设计和运行此类工程提供参考和借鉴。同时，从线路侧功率输出端和负荷侧功率输入端仿真波形可以看出，阻波器可以将断路器分合操作中产生的高次谐波部分过滤掉，从而在负荷侧能得到较为平滑的曲线。利用此模型不仅可以仿真单相接地故障，而且对高压输电线路的各种故障均能做到正确的模拟仿真。

### 参考文献

[1] 张全元. 变电运行现场技术问答[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
ZHANG Quan-yuan. The Technical Questions and Answers of Substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

( 下转第 46 页 continued on page 46 )

[13] 张宇波,罗先觉,薛军义.非完全信息下电力市场中电厂机组出力优化的改进古诺模型[J].中国电机工程学报,2003,23(6):7-12.  
ZHNAG Yu-bo, LUO Xian-jue, XUE Jun-yi. Improved Cournot Model of Generation Unit Output of Generation Companies Under Incomplete Information in Electricity Market[J].Proceedings of the CSEE, 2003,23(6):7-12.

[14] 郭家春,何光宇,王稹,等.发电公司报价决策行为的分析[J].电力系统自动化,2002,26(5):5-8  
GUO Jia-chun, HE Guang-yu, WANG Zhen,et al. Behavior Analysis on the Bidding Strategy of Generation Companies[J].Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5):5- 8.

[15] 高鑫,王秀丽,雷兵,等.独立发电商的策略报价研究[J].中国电机工程学报,2004,24(7):41-46  
GAO Xin, WANG Xiu-li, LEI Bing, et al. Research on Bidding Strategy for an Independent Power Plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(7):41-46.

[16] 张晓东,高波,宋之平.发电企业竞标策略研究[J].中国电机工程学报,2004,24(9):153-157  
ZHANG Xiao-dong, GAO Bo, SONG Zhi-ping. The Study of Bidding Strategies for a Power Supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2004.24(9):153-157.

收稿日期:2006-08-24; 修回日期:2006-10-09

作者简介:

刘建良(1976-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场理论及发电厂报价决策支持系统;

E-mail:ljlhero@163.com

周杰娜(1958-),女,教授,主要从事电力市场理论、发电厂报价决策支持系统、电力系统运行与控制的研究工作;

杨华(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场。

(上接第37页 continued from page 37)

WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi,et al.Study on Location and Penetration of Distributed Generation[J].Automation of Electric Power Systems,2005,17(1):53-58.

[5] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响 [J].电力系统自动化,2001,25(12):53-56.  
LI Cai-hao,DUAN Xian-zhong.Distributed Generation and Its Impaction on Power System[J].Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12):53-56.

[6] Conti S,Raiti S,Tina G. Small-scale Embedded Generation Effect on Voltage Profile: an Analytical Method[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm, and Distrib,2003,150(1):78-86.

[7] Caire R, Retiere N, Martino S. Impact Assessment of LV Distributed Generation on MV Distribution Network [A].Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago:2002.1423-1428.

[8] Pecas Lopes J A. Integration of Dispersed Generation Distribution Networks-impact Studies [A].Proceedings of 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.New York(USA):2002.323-328.

[9] Brown R E,Freeman L A. Analyzing the Reliability Impact of Distributed Generation[A]. Power Engineering Society Summer Meeting .Vancouver(Canada): 2001.1013-1018.

[10] Alvarado F L. Locational Aspects of Distributed Generation[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio(USA):2001.

[11] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, et al. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Ohio(USA): 2001.918-923.

[12] Silvestri A, Berizzi A, Buonanno S. Distributed Generation Planning Using Genetic Algorithms[A]. International Conference on Electric Power Engineering. Budapest(Hungary):1999.

[13] El-Khattam W, Hegazy Y, Salama M. An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning[A]. Power Engineering Society General Meeting.2005.

[14] Celli G, Pilo F. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks Power Industry Computer Applications[A]. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Innovative Computing for Power-electric Energy Meets the Market.2001.81-86.

收稿日期:2006-08-02; 修回日期:2006-09-14

作者简介:

李根富(1981-)男,硕士研究生,研究方向为配网无功优化及分布式发电;E-mail:ligengetx@sina.com

吕林(1963-)男,副教授,硕士生导师,主要从事配网自动化及分布式发电方向的研究工作。

上接第40页 continued from page 40)

[2] 马玲,周家启.电站几种典型主接线的可靠性分析[A].全国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会论文集,2003.93-97.  
MA Ling, ZHOU Jia-qi. Reliability Analysis of the Typical Electric Connections in Substation[A].Proceedings of the EPSA, 2003. 93-97.

[3] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,1995.  
LI Guang-qi. Transient Analysis of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press,1995.

[4] 吴天明,谢小竹,彭彬.MATLAB电力系统设计与分析[M].北京:国防工业出版社,2004.  
WU Tian-ming, XIE Xiao-zhu, PENG Bin. Design and Analysis of Power System Based on MATLAB[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2004.

[5] 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. Principle of Power System Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press,1994.

收稿日期:2006-07-31; 修回日期:2006-09-26

作者简介:

刘宝林(1980-),男,助理工程师,工学学士,主要从事变电运行工作;E-mail:l123b456\_123@163.com

范磊(1981-),男,助理工程师,工学学士,主要从事变电运行工作;

杨毅(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。