

文章编号: 2095-2163(2022)02-0182-05

中图分类号: TP15

文献标志码: A

# 基于 Simulink 的城区高压供电运行系统仿真研究

王如义, 周志峰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 针对现实城区高压电力试验存在规模大、复杂性高和高成本等问题, 系统仿真软件的研发应用成为当前电力系统大规模试验的一个重要发展方向。本研究在理论计算的基础上, 利用 Simulink 仿真工具箱搭建一个 110 kv 的城区高压供电网络仿真模型, 并通过虚拟示波器模拟出城区高压供电系统在正常运行、短路故障和短路故障切除后不同状态的波形图, 搭建了电气一次系统和二次系统, 同时设计开发了图形用户界面, 便于用户使用该系统仿真软件。研究表明: 模型中的系统母线、输电线路和负载端的正常运行、短路故障和故障切除时的电压、电流等参数的变化状况可以真实的反映现实电力系统出现的问题, 为现实电力试验提供一个有效的平台。

**关键词:** 供电网络仿真模型; 虚拟示波器; 城区高压供电; 二次系统

## Simulation research on urban high voltage power supply operation system based on Simulink

WANG Ruyi, ZHOU Zhifeng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** In view of the problems of large scale, high complexity and high cost of urban high-voltage power test, the development and application of system simulation software has become an important development direction of large-scale power system test. In this study, on the basis of the theoretical calculation, using Simulink toolbox to build a city 110 kv high voltage power supply network simulation model, and simulate the urban high voltage power supply system by virtual oscilloscope in normal operation, fault and fault waveform diagram of different state, after resection, set the electrical primary system and secondary system, At the same time, the graphical user interface is designed and developed, which is convenient for users to use the system simulation software. The results show that the variation of voltage and current during normal operation, short circuit fault and fault removal of the bus, transmission line and load terminal in the model can truly reflect the problems of the real power system, and provide an effective platform for the real power test.

**[Key words]** power supply network simulation model; virtual oscilloscope; urban high voltage power supply; secondary system

## 0 引言

大规模的电力试验是城区高压供电系统稳定发展的重要前提, 而在现实中进行大规模的电力试验依旧存在很大的局限性, 一是随着电力系统的规模越来越大, 试验的复杂性也随着电力系统的实际要求逐渐增加; 二是为了保证电力系统的安全性, 在实际生活中进行电力系统的相关试验是不符合现实的<sup>[1]</sup>。与此同时, 供电网络的基础建设成本会随着供电系统的复杂性的增加而增加, 高昂的建设成本和系统的复杂程度限制了电力系统试验的进行。因此, 制作出操作简单且能够为复杂的电力试验提供有效的模拟环境的仿真模拟软件, 更好的模拟电力

系统试验显得尤为重要<sup>[2]</sup>。随着电力系统试验的需求, MATLAB 中的 Simulink 插件的应用也更加频繁<sup>[3]</sup>。本文完成了电气模拟系统主接线的拟定、短路参数的设置、Simulink 搭建一次系统图、二次系统图等主要工作, 利用 Simulink 仿真软件搭建了一个虚拟的城区高压供电运行系统, 为保证仿真电力系统供电可靠运行, 由两个 110 KV 三相电源经过降压变压器后为负载提供电能, 其各自独立运行又互为备用, 并且通过速断保护和过流保护组成二次保护系统, 可以在系统出现短路故障时迅速将故障部分切除, 避免不必要的人员伤害和经济损失。

**作者简介:** 王如义(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 无人驾驶; 周志峰(1976-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 计算机测控、自动驾驶、机器视觉与运动控制等。

**通讯作者:** 周志峰 Email: zhouzjtu@126.com

收稿日期: 2021-08-30

# 1 城区高压供电系统相关参数设计

电力系统中的一些参数不规范是系统短路故障发生的主要原因,对短路电流的相关参数进行计算可以为电力系统仿真模型中元件的选取提供依据,三相短路冲击电流、短路容量和短路电流稳态有效值用来检查电气设备的电动力稳定、热稳定和断路器遮断容量等性能。除此之外,短路电流的计算将有利于分析电力仿真系统中出现的短路故障问题,同时也方便电力系统中二次保护装置的分配以及装置的调试和校正,电力系统中二次系统参数的计算将为保护装置的动作整定提供有利依据。

## 1.1 短路电流的计算

以图1中的输电线路等值电路为例来计算三相短路电流相关参数,三相电源  $S_1$  共引出两条输电线路即线路#1和线路#2,线路#2备用线路的运行状态对线路#1没有影响。首先,在输电线路中设置3个短路故障位置点,依次设置在三相电源的出口处、输电线路的末端和负载末端,3个短路点分别表示为  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$ 。

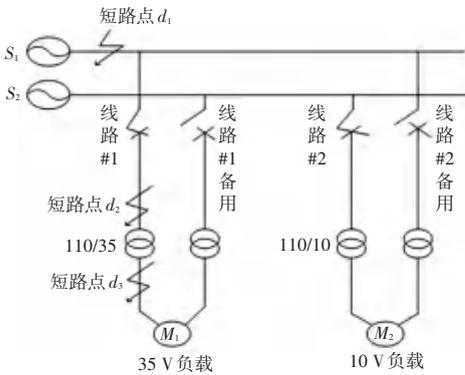


图1 输电线路等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of transmission line

### 1.1.1 选择基准值

根据电力系统基准值选取规定,基准容量  $S_d = 100 \text{ MVA}$ ,基准电压  $U_b = U_{av} = 1.05 U_N$  (115 KV, 38.5 KV)

则  $d_1$  点、 $d_2$  点和  $d_3$  点处的基准电流为式(1)和式(2):

$$I_{d1} = I_{d2} = \frac{S_d}{U_{b1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{100 \text{ MV} \cdot \text{A}}{115 \text{ KV} \times \sqrt{3}} = 0.5(\text{KA}) \quad (1)$$

$$I_{d3} = \frac{S_d}{U_{b2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{100 \text{ MV} \cdot \text{A}}{38.5 \text{ KV} \times \sqrt{3}} = 1.5(\text{KA}) \quad (2)$$

其中:  $U_N$  为额定电压;  $d_1$  点和  $d_2$  点的额定电压为 110 KV;  $d_3$  点的额定电压为 35 KV; 则  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_3$

点的基准电压为 115 KV、115 KV 和 38.5 KV。

### 1.1.2 计算各元件电抗

电源的电抗,式(3):

$$X_s^* = \frac{S_{re}}{S_k} = 0.5 \quad (3)$$

其中:  $S_{re}$  为基准容量(100 MVA),  $S_k$  为两电源的总基准容量(200 MVA)。

输电线路的阻抗,式(4)和式(5):

电抗:

$$X_{l1}^* = x_0 \cdot l_0 \cdot \frac{S_{re}}{S_{b1}} = 0.4 \times 20 \times \frac{100}{115 \times 115} = 0.06 \quad (4)$$

其中,  $l_0$  为输电线路长度,  $x_0$  为电缆的横截面半径。

电阻:

$$R_{l1}^* = r_0 \cdot l_0 \cdot \frac{S_{re}}{S_{b1}} = 0.6 \times 20 \times \frac{100}{115 \times 115} = 0.09 \quad (5)$$

其中,  $l_0$  为输电线路长度,  $r_0$  为电缆单位长度的电阻。

变压器的电抗,式(6)和式(7):

$$X_{T1}^* = \Delta U_k \% \cdot \frac{S_{re}}{S_{T1}} = 0.42 \quad (6)$$

其中,  $\Delta U_k \%$  为变压器的阻抗电压百分比,  $S_{T1}$  为线路#1中变压器的容量值。

$$X_{T2}^* = \Delta U_k \% \cdot \frac{S_{re}}{S_{T2}} = 0.53 \quad (7)$$

其中:  $\Delta U_k \%$  为变压器的阻抗电压百分比,  $S_{T2}$  为线路#2中变压器的容量值。

### 1.1.3 等值电路

将输电线路中的所有元件用等值阻抗代替,即可得到对应的等值电路,电源  $S_1$  供电等值电路。

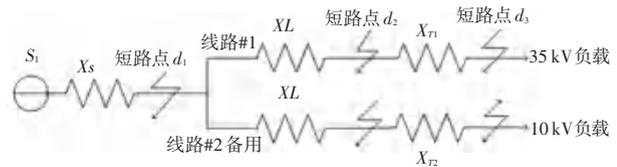


图2 电源  $S_1$  供电等值电路

Fig. 2 Power supply  $S_1$  power supply equivalent circuit

举例:计算  $d_1$  点三相短路电流。

$d_1$  点短路的总电抗,式(8):

$$X_{d1}^* = X_s^* = 0.5 \quad (8)$$

三相短路电流周期分量的标么值,式(9):

$$I_{d1}^* = \frac{1}{X_{d1}^*} = \frac{1}{0.5} = 2 \quad (9)$$

三相短路电流周期分量的实际值,式(10):

$$I_{d1(3)} = I_{d1*} \cdot I_{d1} = 2 \times 0.5 = 1(\text{KA}) \quad (10)$$

冲击电流,式(11):

$$i_{sh1} = \sqrt{2} \cdot I_{d1(3)} \cdot K_c = 2.55(\text{KA}) \quad (11)$$

其中,  $K_c$  为冲击系数,取 1.8。

冲击电流有效值,式(12):

$$I_{sh1} = I_{d1(3)} \cdot \sqrt{1 + 2(K_c - 1)^2} = 1.51(\text{KA}) \quad (12)$$

其中:  $K_c$  为冲击系数,取 1.8。

三相短路容量,式(13):

$$S_{d1} = \sqrt{3} \cdot U_{b1} \cdot I_{d1(3)} = \sqrt{3} \times 115 \times 1 = 199.1(\text{MVA}) \quad (13)$$

同样的原理,可以求出  $d_2$  点和  $d_3$  点短路电流。

## 1.2 二次保护系统相关参数计算

本研究模拟了电流速断保护和过电流保护对电力系统的保护作用,以下为两种保护动作整定值的计算过程。

(1) 变压器的额定容量计算,公式(14)和公式(15):

$$S_{1N} = \sqrt{3} \times U_{1N} \times I_{1N} \quad (14)$$

$$S_{2N} = \sqrt{3} \times U_{2N} \times I_{2N} \quad (15)$$

其中:  $U_{1N}$ 、 $I_{1N}$  为线路#1 中变压器的额定电压和额定电流;  $U_{2N}$ 、 $I_{2N}$  为线路#2 中变压器的额定电压和额定电流。

(2) 变压器低压侧三相短路电流经验计算,公式(16):

$$I_{kmax}^{(3)} = \frac{100 \times I_{2N}}{U_k \%} \quad (16)$$

其中,  $I_{kmax}$  是最大的三相短路电流,  $U_k \%$  是短路电压百分数。

(3) 变压器的差动保护动作电流  $I_{op(d)}$  计算不等式(17):

$$I_{op} \geq K_{rel} \cdot I_{kmax} \quad (17)$$

式中:  $K_{rel}$  是可靠系数(为减少非周期分量的影响而引用,取 1.3,  $I_{Lmax}$  保护区外最大负荷电流。

(4) 电流速断保护整定的计算:根据避开被保护线路末端最大短路电流的原则整定计算动作电流  $I_{op}$ ,公式(18):

$$I_{op} = K_{rel} \cdot I_{kmax} \quad (18)$$

其中,  $K_{rel} = 1.3$ ,  $I_{kmax}$  是最大短路电流,

(5) 过电流保护装置整定值的计算:

(a) 依照躲开线路中最大的负荷电流的原则整定计算动作电流  $I_{op}$ ,公式(19):

$$I_{op} = \frac{I_{re}}{K_{re}} = \frac{K_{rel} \cdot K_{ms}}{K_{re}} \cdot I_{Lmax} \quad (19)$$

其中,  $K_{rel} = 1.25$ ;  $K_{re} = 0.85$ ;  $K_{ms}$  是自启动系数,与负载性质相关,一般取值 1.5~3.0;  $I_{Lmax}$  是线路#1 最大负荷电流,式(20):

$$I_{Lmax} = \frac{S_d}{\sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi} \quad (20)$$

(b) 保护装置的灵敏系数  $S_p$

为了更好的对输电线路进行保护,保护装置需要很高的灵敏度,常用灵敏系数( $S_p$ ) 来表示保护装置的灵敏度,式(21)。

$$S_p = \frac{I_{kmin}}{I_{op1}} \geq 1.5 \quad (21)$$

其中:  $I_{kmin}$  是线路最小运行方式下的两相短路电流,  $I_{op1}$  是保护装置一次动作电流,公式(22):

$$I_{op1} = \frac{I_{op} \cdot K_i}{K_w} \quad (22)$$

其中:  $K_i$  是电流互感器变比,  $K_w$  是保护装置的接线系数(采用两相继电器接线时取 1)。

(c) 保护装置的动作时限通常取 0.02~0.06 s 的延迟,并且和下一级保护动作时间配合。

## 2 基于 MATLAB/Simulink 的城区高压供电运行系统建模

### 2.1 系统参数设置

高压输电线路电压和电流的频率均为 50 Hz,输电线路的长度设置为 20 km;三相电源采用 Yg 型连接,选择 Internal 和 Specify short - circuit level parameters,相间电压为 121 Kv,频率为 50 Hz;变压器模块选择标么值 pu,额定容量和频率设置为 25 MVA、50 Hz,一次侧相间电压设置为 121 kV,二次侧相间电压设置为 38.5 kV;负载连接方式为 Y 型接地,额定相间电压设置为 35 kV,频率为 50 Hz,有功功率设置为 20 kW,容性无功功率为 100 var。

### 2.2 电力系统模型搭建

在 Simulink 中建立的一次系统仿真模型,如图 3 所示。当电力系统中的一条输电线路出现故障时,该输电线路中的二次保护装置能够快速检测到参数变化,且对这些变化的参数快速做出反应,将故障部分快速地从电路中切除,同时闭合电力系统中的备用线路的开关。在 Simulink 中搭建的具有保护装置的二次主系统仿真模型,如图 4 所示。

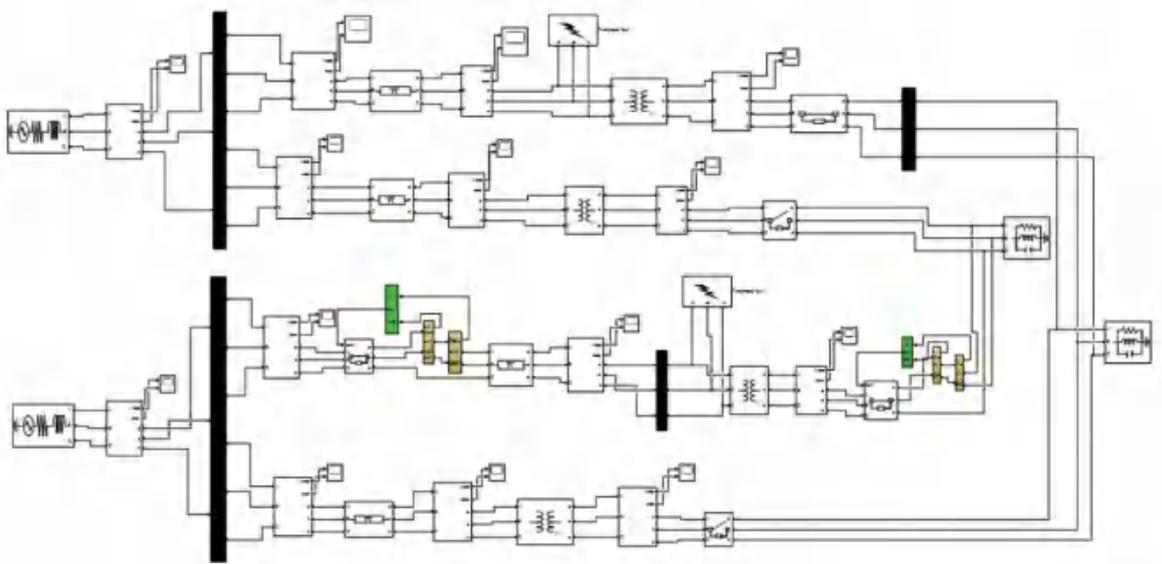


图3 一次系统仿真模型

Fig. 3 A system simulation model

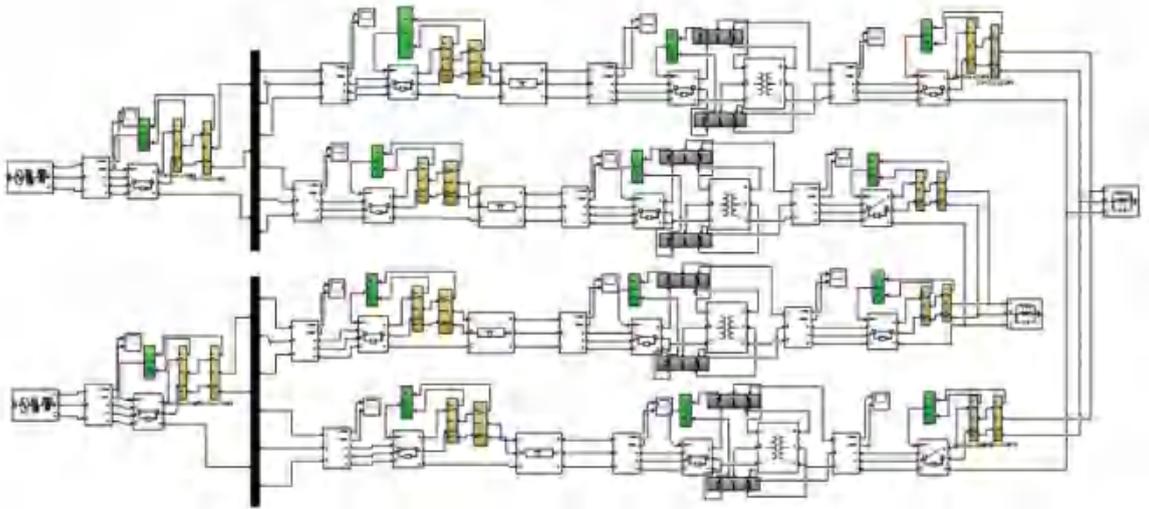


图4 二次主系统仿真模型

Fig. 4 Secondary master system simulation model

### 3 Simulink 仿真运行与结果分析

本文给出了在电力系统的电源出口处、输电线路处和负载端的不同状态下的相关仿真结果示例。仿真结果图中,黄线、绿线和红线分别代表 A 相、B 相和 C 相的电流、电压变化曲线。

#### 3.1 电源出口处仿真结果

电源出口处不同状态下的仿真电压、电流波形图如图 5 所示。正常运行时,电压和电流的波形都是正弦波,三相相位差为  $120^\circ$ ;在  $0.03 \sim 0.07 \text{ s}$  内发生三相短路故障时,短路电压变为 0,电流瞬时变大,该电源没有受到影响,故电流波形仍然是正弦波;当  $0.07 \text{ s}$  故障切除后,电压和电流都变为 0。

#### 3.2 输电线路处仿真结果

输电线路处不同状态下的仿真电压、电流波形图如图 6 所示。正常运行时,电压和电流波形为正弦波,两者对应的幅值是一样的,与理论波形一致;当在  $0.02 \sim 0.07 \text{ s}$  内发生短路故障时,电流变为 0;当  $0.07 \text{ s}$  故障切除后,电压和电流的电位都变为 0。

#### 3.3 负载端仿真结果

负载端的不同状态下的仿真电压、电流波形图如图 7 所示。在正常运行状态下,A、B、C 三相相位相差  $120^\circ$ ,波形对应的电压和电流幅值是一样的;在  $0.06 \sim 0.12 \text{ s}$  内发生三相短路故障时,三相短路处电位降低,与地的电位几乎一致,同时电流的幅值增加;在  $0.06 \text{ s}$  短路故障切除后,电压和电流的波形都变为 0。

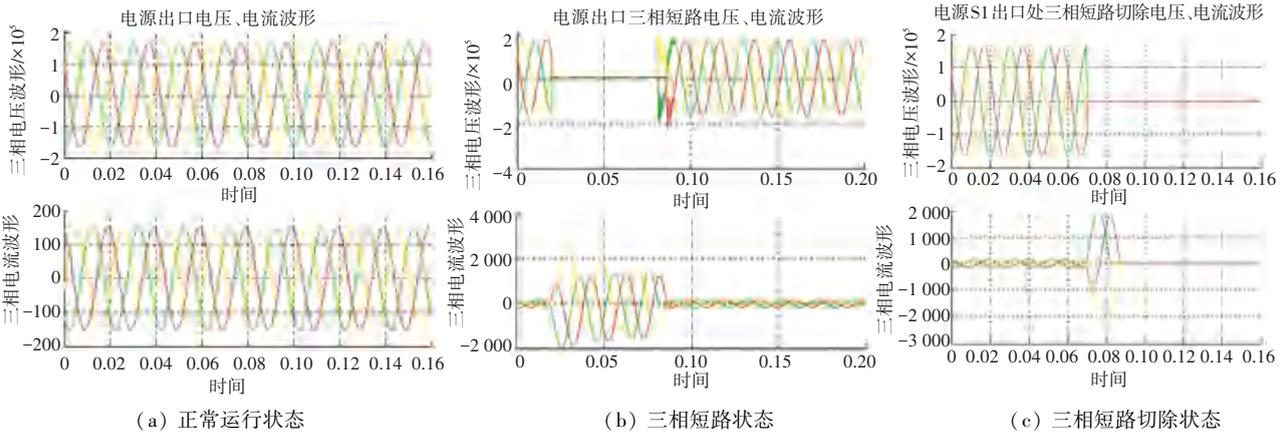


图5 电源出口处仿真曲线图

Fig. 5 Power outlet simulation curve

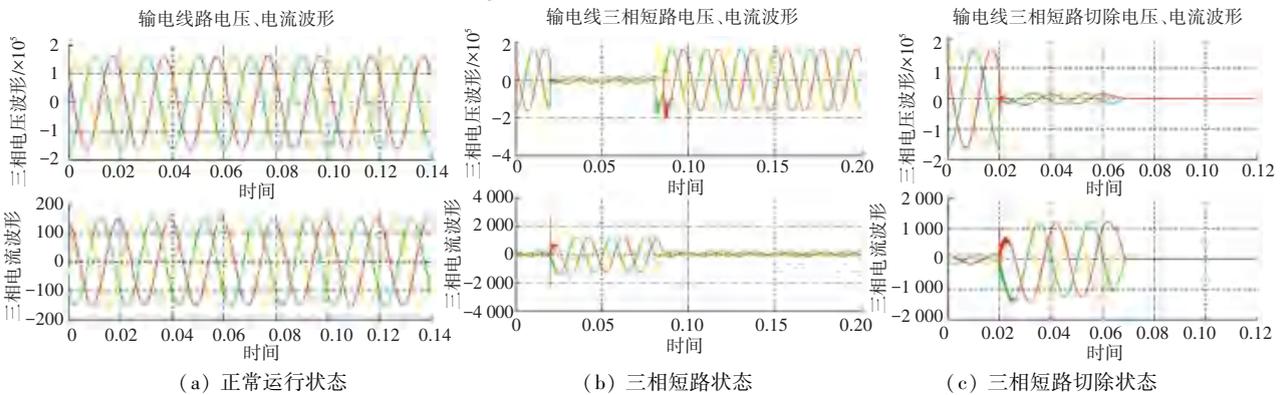


图6 输电线路处仿真曲线图

Fig. 6 Transmission line simulation curve

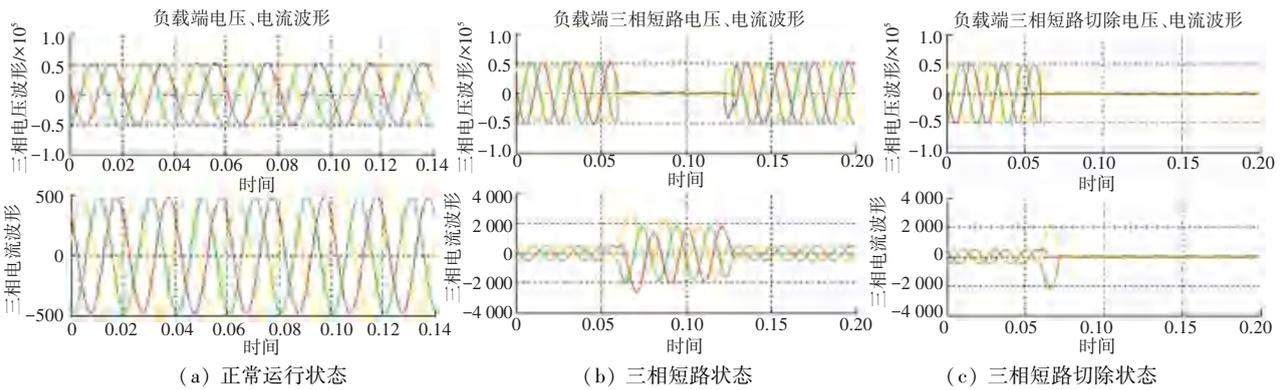


图7 负载端仿真曲线图

Fig. 7 Load side simulation curve

### 4 结束语

根据目前城区高压供电系统电力试验的发展现状,本文结合速断保护和过电流保护在电力系统领域的应用前景,基于电力系统的作业特点,对城区高压供电系统进行设计,并在 Simulink 仿真环境下结合 GUI 功能界面对设计中的城区高压供电系统进行仿真测试。共设置了十二种运行仿真状态,不仅可以反映电力系统出现短路故障时的三相电流、电压的变化情况,还可以进行二次保护系统对输电线路、电源的

过电流保护、负载保护相关方面的仿真实验。仿真结果说明,城区高压供电系统的安全性和稳定性都能够满足设计要求,仿真结果图和理论计算所得图形基本一致,体现了该电力系统仿真结果的可靠性。

### 参考文献

[1] 刘介才. 工厂供电[M]. 机械工业出版社,2006.  
 [2] 于群. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 机械工业出版社 2011.  
 [3] 刘保柱. MATLAB7.0 从入门到精通[M]. 人民邮电出版社, 2010.