

矿井电网漏电暂态特征分析及仿真

赵建文, 侯媛彬

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了便于利用暂态特征实现矿井电网漏电识别的快速性与可靠性, 建立了矿井低压电网单相漏电暂态过程的数学模型, 分析获得了漏电的零序电压、零序电流、接地电流、各相对地电压等的动态时域数学描述。以某矿井 660 V 电网为例, 利用 Matlab 的 Simulink 软件包, 搭建了接近实际的漏电模型; 对理论建模分析的正确性, 不同漏电电阻、不同漏电角、不同漏电点和线路长度等与漏电特征之间的关系等进行了大量仿真; 仿真波形的重合性和相似度证明了理论建模的正确性。在暂态过渡阶段, 零序电压、零序电流及它们冲击值等随漏电电阻的增大而减小, 而受漏电角变化的影响较大; 同时, 故障线路的零序电流的波形态势(极性、大小、冲击值、衰变过程)和非故障支路的明显不同, 这一暂态特征不受漏电电阻、漏电角、漏电点、线路长度等因素的影响。这些为矿井电网的判漏和选漏的研究提供了理论依据。

关键词: 矿井漏电; 暂态模型; 分析仿真; 零序; 波形; 特征

Analysis and simulation of leakage transient in coal mine low voltage network

ZHAO Jian-wen, HOU Yuan-bin

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to realize rapid and reliable identification of coal mine low voltage distribution network leakage using transient characteristics conveniently, transient mathematical model of coal mine single-phase leakage is established, the instantaneous expressions of zero-sequence voltage, zero-sequence current, ground current and phase-ground voltages are all presented through analysis for that. By simulink of MATLAB, a practical 660 V coal mine distribution network simulation model is set up; the relationships between leakage characteristics and different leakage resistances, leakage angles, leakage points and different line length are simulated; validity of theory model analysis is done also. The superposition and high similarity of leakage wave forms confirm that theory analysis model is correct. In transient transition course, zero-sequence voltage, zero-sequence currents and their impact values decrease with the increase of leakage resistance, and are influenced by leakage angle; transient zero-sequence current waveform(including polarity, dimension, impact value, and decay process)of fault line is quite different from normal lines', and this feature is not influenced by leakage resistances, leakage angles, leakage points, and line length. These results provide theory evidences for research of coal mine leakage protection.

Key words: coal mine leakage; transient model; analysis and simulation; zero-sequence; waveform; characteristics

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0055-06

0 引言

矿井低压电网漏电保护不同于中压配电网单相接地保护的最大特点是, 中压电网故障后可运行一段时间(如 2 h)、动作于信号, 而矿井低压电网漏电需满足 30 mA·s 的速动性要求、且动作于可靠跳闸, 矿井漏电的处理更加困难。

近年来, 对矿井漏电保护有借鉴意义的中压配

电网的单相接地故障研究中, 许多学者提出了暂态特征检测的方法选线, 如采用 B 样条小波包多频带奇异量选线^[1-3]、暂态行波小波分析选线^[4-8]、零序电流小波变换系数选线^[9-11]等方法, 利用暂态信号处理故障显示出强大的生命力。目前的研究主要集中在小波算法的应用上, 对暂态过程的特征缺乏深入研究^[12]。另外, 故障角、网络结构、线路长度、接地点的位置、接地电阻等影响暂态特征。

传统的理论研究和漏电保护的设计均以稳态分析的结果为依据, 如附加直流检测法^[13]、零序功率方向法^[14], 未能考虑电网漏电发生后的暂态过程。

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(09JK603); 西安科技大学青年培育基金项目(200626)

随着现代微电子技术的发展,特别是高速处理器件的出现,为暂态过程的检测提供了可能^[12]。执行开关动作速度的提高,有可能使得许多漏电故障在暂态过程尚未结束之前就被切除。这样,现代漏电保护就不能忽略漏电暂态过程的电气参数^[14]。

因此,研究矿井电网漏电暂态过程的机理和特点,显得非常必要。明确漏电暂态过程的特点是判漏和选漏的理论基础。目前关于矿井漏电暂态方面的文献甚少。

1 漏电暂态过程的建模分析

假设矿井低压电网具有 M 条馈出回路,漏电发生在第一回路的 A 相。利用网络理论的 Thevenin 定理可得到漏电的等效电路如图 1 所示,电源电压 $u_A = U_m \sin(\omega t + \theta)$; r_k 和 C_k 为第 k 条支路的对地绝缘电阻和对地电容; R_g 为漏电过渡电阻。漏电暂态过程的求解,其实就是图 1 开关 K 突然合闸的暂态过程的求解。

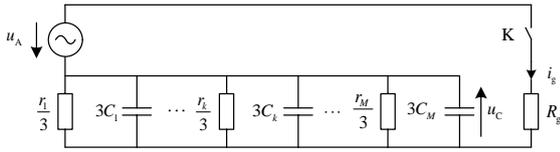


图 1 漏电等效电路

Fig.1 Leakage equivalent circuit

1) 对图 1 电路,列微分方程为:

$$\frac{du_C}{dt} + \frac{r+3R_g}{3R_g r C} u_C = \frac{1}{3R_g C} u_A$$

其中: r 为电网的总的对地绝缘电阻, $r = 1 / \sum_{k=1}^M \frac{1}{r_k}$;

C 对地总电容, $C = \sum_{k=1}^M c_k$ 。解微分方程求出电压 u_C ,

再利用 $i_g = \frac{u_A - u_C}{R_g}$ 得到相漏电流的瞬时值为:

$$i_g = i_s + i_t = I_{gm} \sin(\omega t + \theta + \varphi) + I_{gi} e^{-t/\tau} \quad (1)$$

可见,漏电电流由稳态分量 i_s 和暂态分量 i_t 组成。其中, I_{gm} 为漏电电流稳态分量的幅值,

$$I_{gm} = U_m / R_g \sqrt{1 + r(r + 6R_g) / 9R_g^2 (1 + \omega^2 C^2 r^2)}$$

I_{gi} 为暂态分量的初值:

$$I_{gi} = U_m \sin \theta / R_g - I_{gm} \sin(\theta + \varphi)$$

φ 为 i_s 超前于 u_A 的相位角:

$$\varphi = \arctan[r^2 \omega C / (r + 3R_g + 3\omega^2 C^2 R_g r^2)]$$

时间常数 τ 表征暂态过程衰减快慢,与电网的总对地绝缘电阻 r 、对地总电容 C 、漏电电阻 R_g 等参数,即与电网的结构有关, $\tau = 3R_g C r / (r + 3R_g)$ 。

2) 各相对地电压瞬时值为:

$$u_{ag} = U_{gm} \sin(\omega t + \theta + \varphi) + U_{gi} e^{-t/\tau}$$

$$u_{bg} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + \theta - 150^\circ) + U_{gm} \sin(\omega t + \theta + \varphi) + U_{gi} e^{-t/\tau}$$

$$u_{cg} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + \theta + 150^\circ) + U_{gm} \sin(\omega t + \theta + \varphi) + U_{gi} e^{-t/\tau} \quad (2)$$

其中: $U_{gm} = R_g I_{gm}$; $U_{gi} = R_g I_{gi}$ 。

3) 利用瞬时对称分量法^[15-16]得到的零序电压 u_0 为:

$$u_0 = -U_{0m} \sin(\omega t + \theta - \varphi_{u0}) + U_{gi} e^{-t/\tau} \quad (3)$$

其中: $U_{0m} = r U_m / \sqrt{(r + 3R_g)^2 + 9\omega^2 r^2 C^2 R_g^2}$ 为零序电压稳态分量的幅值; U_{gi} 为零序电压暂态分量的初值; φ_{u0} 为零序电压超前于 u_A 的相角, $\varphi_{u0} = \arctan[3\omega r C R_g / (r + 3R_g)]$ 。

4) 利用瞬时对称分量法得到故障支路的零序电流 i_{01} 为:

$$i_{01}(t) = I_{01m} \sin(\omega t + \theta - \varphi_{u0} + \varphi_{i01}) + I_{01t} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

其中: $I_{01m} = \frac{U_m}{r_1} \sqrt{\frac{(r_1 - r)^2 + \omega^2 r_1^2 (C - c_1)^2}{(r + 3R_g)^2 + 9\omega^2 r^2 C^2 R_g^2}}$, 为故障支路

零序电流稳态分量的幅值; $I_{01t} = (\tau r_1 - 3c_1 R_g r_1 + 3R_g \tau) I_{gi} / (3\tau r)$, 为故障支路零序电流暂态分量的初值; $\varphi_{i01} = \arctan[\omega r r_1 (C - c_1) / (r_1 - r)]$, 为故障支路零序电流超前于零序电压的相位。

5) 非故障支路的零序电流为:

$$i_{0k} = -I_{0km} \sin(\omega t + \theta - \varphi_{u0} + \varphi_{i0k}) + I_{0kt} e^{-t/\tau} \quad (5)$$

其中: $I_{0km} = \frac{U_m r}{r_k} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 r_k^2 c_k^2}{(r + 3R_g)^2 + 9\omega^2 r^2 C^2 R_g^2}}$, 为非故障

支路零序电流稳态分量的幅值; $I_{0kt} = U_{gi} (\tau - r_k c_k)$, 为非故障支路零序电流暂态分量的初值; $\varphi_{i0k} = \arctan \omega r_k c_k$, 为非故障支路零序电流超前于零序电压的相位。

由式(1)~(5)可以看出,发生单相漏电后,各漏电信号均包括稳态工频分量和衰减指数形式的暂态分量;各信号的稳态分量均与电源同频率,且具有相应的相位差;各信号的暂态分量具有相同的时间常数,即具有相同的衰减速度。

2 单相漏电故障仿真

2.1 仿真模型的建立

以某矿井 660 V 电网为对象,如图 2 所示。该 660 V 系统是含有放射式和干线式接线的混合典型

网络, 共有 5 条馈出回路, 每一回路又有若干段, 如第五回路包含 $l_{51} \sim l_{57}$ 段。在图 2 中, 为了简单, 未画出各支路的馈电开关, 箭头后为负载。变压器 T 为 KBSG-315/6 型矿用隔爆干式变压器。

仿真模型采用 Matlab 的 SimPowerSystem 建立, 各段线路、变压器、负载等元件的参数全部依上述 660 V 系统实际值设定, 建立了接近实际的矿井漏电模型。仿真时假设线路 L_{12} 的 A 相发生单相漏电。经计算系统总对地电容约为 $0.91 \mu\text{F}$, 总地绝缘电阻设为 $50 \text{ k}\Omega$ 。

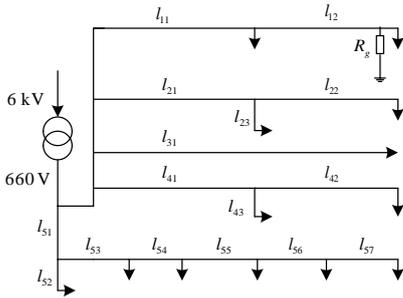


图 2 660 V 矿井供电系统

Fig.2 660 V coal mine power supply system

2.2 基于波形相关性的理论模型的准确性

为了验证前文理论分析所得数学表达式对漏电过程描述的准确性, 利用 Matlab 的 M 文件编程, 根据式(1)~(5)计算绘制出了各支路的电压和电流、零序电压、零序电流的波形变化关系。将此理想的 M 文件计算所得波形与建立的接近实际的模型文件仿真波形对比, 二者的波形基本重合。由此证明了理论建模分析的准确性。限于篇幅, 只给出漏电电流的变化波形, 如图 3 所示, 实线为 M 文件波形, 虚线为模型文件仿真波形。其中, 漏电电阻取 500Ω , 漏电的起始时刻 0 s , 电源电压初相角 $\theta = \pi/2$ 。

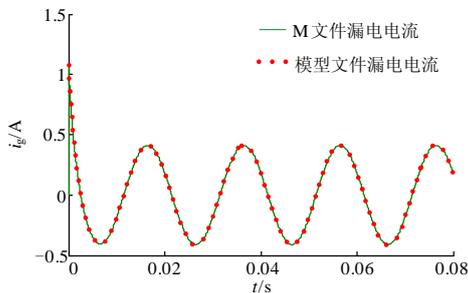


图 3 M 文件和模型文件的漏电电流仿真波形

Fig.3 Leakage waveforms from M-file and model

为了定量地说明数学表达式漏电模型与实际系统的接近程度, 应用相似度来确定 M 文件波形与模型文件波形的重合接近程度。信号 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的相

似度表示为 $\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\left[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n) \right]^{1/2}}$;

相似度越接近于 1, 说明两个信号越相似^[17]。表 1 是计算各漏电特征量在漏电发生后 3 个周波内的相似度。由表 1 看出, 各漏电信号的数学表达式波形与实际仿真波形的相似度最小为 0.998。这更进一步说明, 对于由电缆组成的矿井低压网络, 其线路阻抗对漏电信号的影响较小, 而绝缘电阻和对地电容对漏电信号起主要作用。后文的结果由接近实际的模型文件仿真取得。

表 1 漏电信号的相似度

Tab.1 Similarity of leakage signals

相	u_A	u_B 和 u_C	u_0	i_{01}	i_{02}	i_{03}	i_{04}	i_{05}
似	1	0.998	1	0.999	0.998	0.998	0.999	0.999
度								

2.3 漏电电阻与故障特征量的关系

对矿井漏电保护而言, 漏电电阻的大小是判定漏电逻辑是否动作的依据, 因此, 漏电信号特征与漏电电阻的关系至关重要。仍然以线路段 l_{12} 的末端发生漏电为例, 漏电角为 90° (即漏电相的电源电压过峰值点时发生漏电), 取漏电电阻 R_g 分别为 50Ω 、 $1 \text{ k}\Omega$ 、 $11 \text{ k}\Omega$ 和 $30 \text{ k}\Omega$ 进行 A 相漏电仿真, 各相对地电压、零序电压和各支路的零序电流的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 在暂态过渡阶段, 各相对地电压、零序电压、各支路零序电流等暂态量的波形态势明显不同于故障前和故障后稳态, 且随漏电电阻变化明显, 具体为: 1) 随着漏电电阻的增加, 故障相的对地电压增大, 直至恢复为正常值。2) 零序电压、非故障相对地电压、各支路零序电流随漏电电阻的增大而减小; 漏电电阻较大时, 非故障相对地电压恢复正常。3) 零序首半波的冲击电流随漏电电阻的增加而减小。

由仿真可看出: 暂态过渡阶段, 故障线路的零序电流的波形态势 (极性、大小、冲击值、衰变过程) 和非故障支路的明显不同, 且这一特性不受漏电电阻的大小的影响。各非故障线路的零序电流幅值差别不大。

2.4 漏电角及故障点对暂态零序量的影响

漏电角表示漏电发生时, 故障相的初相角。故障发生时的漏电角可能为 $[-\pi, \pi]$ 区间的任意值。以线路 l_{12} 末端漏电为例, 漏电电阻取 500Ω , 分别在漏电角 $\theta = -3\pi/4, -\pi/2, -\pi/4, 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 时, 发生单相漏电, 即模拟在故障相电压分别在正过零点、负过零点、正峰值点、负峰值点、

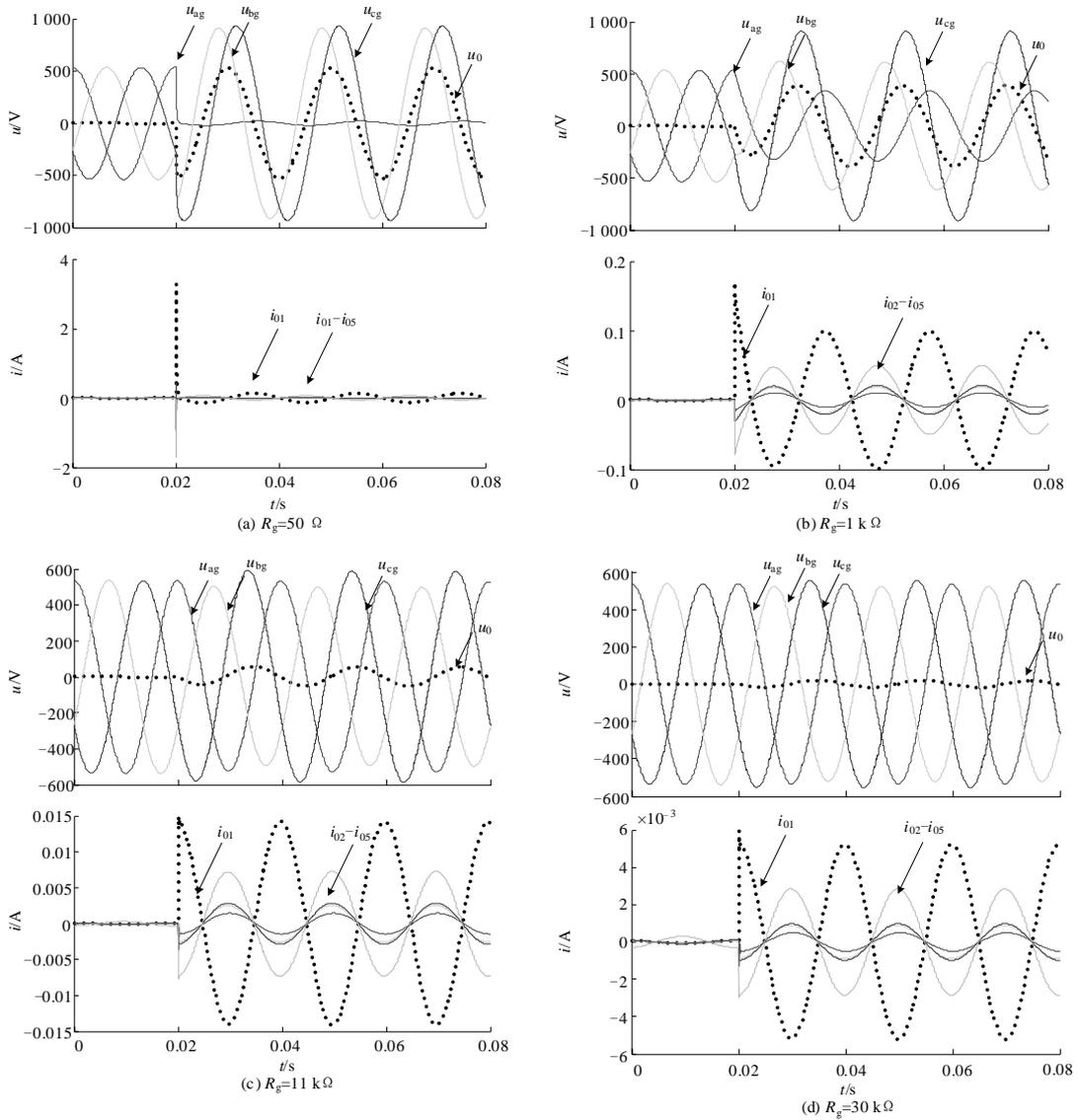


图 4 漏电特征量随漏电电阻的变化波形
Fig. 4 Characteristic waves with leakage resistances

正负半波的其他点发生漏电。图 5 显示了 $\theta = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ 时漏电零序电压和各支路的零序电流。由仿真可知，漏电角 θ_x 的所有漏电特征量的波形与满足 $\theta - \theta_x = \pi$ 的漏电角 θ 的波形具有极性相反对称性，即 0 与 $-\pi$ 、 $\pi/4$ 与 $-3\pi/4$ 、 $\pi/2$ 与 $-\pi/2$ 、 $3\pi/4$ 与 $-\pi/4$ 的波形极性相反；本文重点给出了 $\theta \in [0, \pi]$ 时，零序量的特性。

由图 5 可以看出，在暂态过渡阶段，零序电压、零序电流及其它们的冲击值和幅值受漏电角的影响较大。在 $\theta \in [0, \pi]$ 时，具体变化为：1) 随着 θ 的增大，零序电压负首半波的幅值减小，在 $\theta = 0$ 时最大，

在 $\theta = \pi$ 点零序电压首半波的极性发生反相。2) 在漏电发生时刻，零序电压的极性与故障相电压的极性相反。3) 在 $\theta \in [0, \pi/2]$ 内，零序电流首半波的冲击值随 θ 的增大而增大；在 $\theta \in [\pi/2, \pi]$ 内，零序电流首半波的冲击值随 θ 的增大而减小；零序电流的冲击值在 $\theta = \pi/2$ 时最大。

由图 5 还可以看出：暂态过渡阶段，故障线路的零序电流的波形态势（极性、大小、冲击值、衰变过程）和非故障支路的明显不同，且这一特性不受漏电角变化的影响。

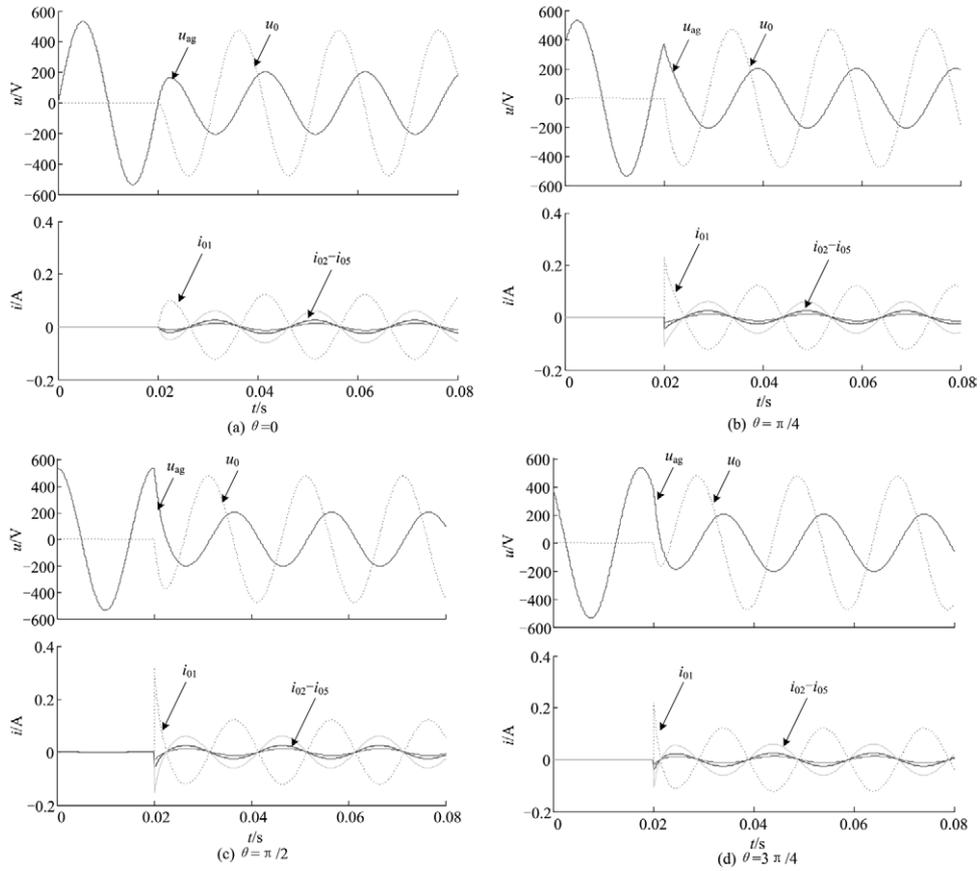


图 5 零序特征量随漏电角的变化波形

Fig. 5 Zero-sequence characteristic with leakage angles

在对不同漏电点对零序特征量影响的仿真中, 保持漏电阻 ($R_g=500 \Omega$)、漏电角 ($\theta = \pi/2$) 等参数

不变, 分别在线路 l_1 的首端、中间、末端等处产生 A 相接地故障。图 6 是不同点的漏电波形。

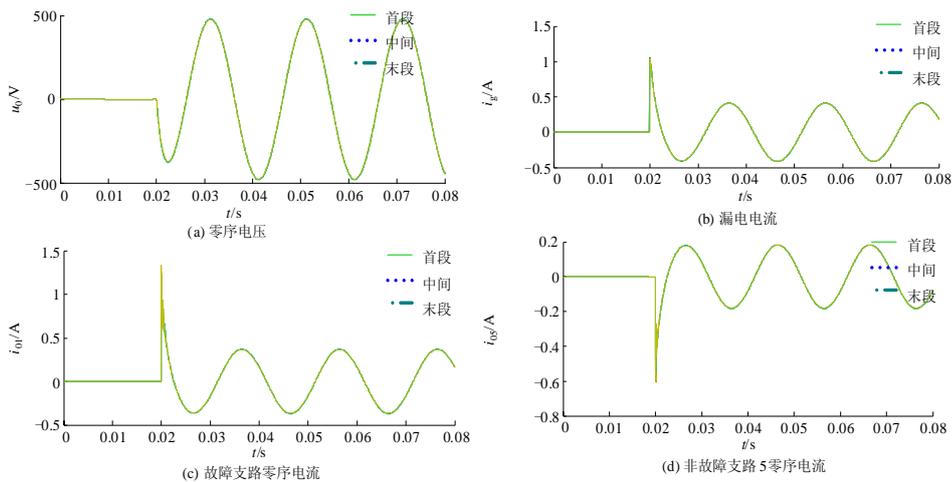


图 6 不同漏电点的漏电特征量变化波形

Fig. 6 Characteristic waves with different leakage points

由图 6 可以看出, 漏电电流、零序电流、零序电压等对不同漏电点的波形基本重合。矿井低压网

络主要为电缆线路, 对地绝缘电阻和对地电容对漏电电流的特性起主要作用, 不同漏电点对漏电电流

的影响极小,即线路的阻抗对漏电电流的影响极小,仿真结果也证明了这一点。

3 结论

1)各信号理论波形与实际仿真波形的高相似度证明:本文所建立的漏电暂态数学模型准确,漏电过渡过程特征量可用工频稳态分量和衰减指数暂态分量的叠加来描述。

2)对矿井低压电网而言,暂态过渡时间大多为半个周波,一般不超过1个周波。漏电暂态持续时间非常短暂,利用暂态特征判漏、选漏时需注意暂态特征持续时间。

3)在暂态过渡阶段,零序电压、零序电流及它们的冲击值随漏电电阻的增大而减小,它们的幅值,过渡阶段的大小和冲击值受漏电角的影响较大;零序电压在过渡阶段的波形态势完全不同于故障前。

4)在暂态过渡阶段,故障线路的零序电流波形的整体变化态势与非故障支路的差别明显;而所有非故障支路零序电流差别甚小;且这一暂态特征不受漏电阻、漏电角、漏电点、线路长度等因素的影响。作者利用此特征和信号距离度的信号辨识方法,提出了快速选漏方法。

参考文献

[1] 贾清泉, 窦春霞, 张华, 等. 配电网单相故障多频带奇异量选线方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2):74-77.
JIA Qing-quan, DOU Chun-xia, ZHANG Hua, et al. Singularity detection for phase-to-ground fault in non-effective grounded power networks based on multi-frequency bands analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 74-77.

[2] 薛永端, 陈羽, 徐丙垠, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障监测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 85-87.
XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic transient based monitoring system for earth fault in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 85-87.

[3] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10):78-82.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

[4] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4):1-6.
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for

distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.

[5] SU Qian-li, DONG Xin-zhou, SHI Shen-xing, et al. A new principle of fault line selection for distribution [C]. //Proceedings of International Conference on 7th Developments in Power System and Protection, IEE. Netherlands: 2001: 379-382.

[6] DONG Xin-zhou, BI Jian-guang, BO Zhi-qian. Technique of fault lineselection for non-directed ground neutral system[C]. //Proceedings of 37th UPEC. UK: 2002: 193-196.

[7] BI Jian-guang, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. A new method to select fault line for distribution system[C]. //Proceedings of International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Korea: 2004: 101-105.

[8] 黄悦华,王永辉.暂态初始行波相位比较法接地故障选线研究[J].中国电力, 2008, 41(4):11-14.
HUANG Yue-hua, WANG Yong-hui. A study of earth fault detection by comparing phase of initial transient traveling wave[J]. Electric Power, 2008, 41(4): 11-14.

[9] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.

[10] 王娜, 周有庆, 龚静.小波变换在配电网单相接地故障选线中的应用[J].电力自动化设备, 2003, 23(10): 27-30.
WANG Na, ZHOU You-qing, GONG Jing. Application of wavelet transform to phase-to-ground fault detection in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 27-30.

[11] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J].中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al. A new criterion for earth fault selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.

[12] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 37-41.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. Analysis of transient characteristics of signals phase earth fault in non-solidly earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 37-41.

(下转第 64 页 continued on page 64)

参考文献

[1] 杨晋柏. 南方互联电网安全稳定控制系统的配置、功能及作用[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (5): 46-49.
YANG Jin-bai. The configuration and function of security and stability control system for south China interconnected power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (5): 46-49.

[2] 张启平, 曾兆祺, 王觉英. 华东 500 kV 北仑港——兰亭系统稳定控制装置的功能和作用[J]. 电网技术, 1997, 21 (1): 9-11.
ZHANG Qi-ping, ZENG Zhao-qi, WANG Jue-ying. Analysis of system stability control device used in beilungang-lanting 500 kV system in east China grid[J]. Power System Technology, 1997, 21 (1): 9-11.

[3] 章建, 周全仁, 樊福而, 等. 湖南电网安全稳定控制系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (3): 48-51.
ZHANG Jian, ZHOU Quan-ren, FAN Fu-er, et al. Security and stability control system in Hunan power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (3): 48-51.

[4] 丁立, 邹圣权. 湖北电网微机稳控装置运行状况和发展前景[J]. 湖北电力, 2006, 30 (5): 13-14.
DING Li, ZOU Sheng-quan. Operation and developing prospect of computerized stability control equipment in Hubei power grid[J]. Hubei Electric Power, 2006, 30 (5): 13-14.

[5] 牟宏, 邱夕兆, 马志波. 山东 500 kV 电网安全稳定控制系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (3): 45-47.
MU Hong, QIU Xi-zhao, MA Zhi-bo. Security and stability control system of Shandong 500 kV power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (3): 45-47.

[6] 胡伟, 翟咏梅. 江苏电网安全稳定控制现状分析与展望[J]. 江苏电机工程, 2003, 22 (6): 1-5.
HU Wei, ZHAI Yong-mei. Present situation analysis and

prospect of security and stability control system of Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22 (6): 1-5.

[7] 蓝波卫. 安全稳控装置在发电厂的应用[J]. 电力安全技术, 2009, 11 (1): 64-65.
LAN Bo-wei. The application of security and stability control device in power plant[J]. Electric Safety Technology, 2009, 11 (1): 64-65.

[8] 汪秀丽. 2005 年大停电与我国电力系统可靠性管理[J]. 水利电力科技, 2005, 31 (4): 36-42.
WANG Xiu-li. Blackout in 2005 and the management of China's electric power system reliability[J]. Water Resources and Electric Power, 2005, 31 (4): 36-42.

[9] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[10] 孙光辉. 区域稳定控制中若干技术问题[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 4-7.
SUN Guang-hui. Techniques in regional stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 4-7.

[11] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 42-48.
ZHOU Yu-lan, WANG Yu-ling, ZHAO Man-yong. Statistics of operation situation of protective relays and automation devices of power systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 42-48.

收稿日期: 2009-10-28; 修回日期: 2010-04-13

作者简介:

张如义 (1974-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhngry@163.com

周玲 (1964-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为继电保护、电力系统运行与控制。

(上接第 60 页 continued from page 60)

[13] 牟龙华, 孟庆海, 刘建华. 可通信式智能选择性漏电保护系统的研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 82-86.
MU Long-hua, MENG Qing-hai, LIU Jian-hua. Research on communication-capable ground-fault protection system with intelligence and selectivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (1): 82-86.

[14] 邹有明, 张根现, 刘士栋, 等. 工矿企业漏电保护技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 102-110.

[15] Arindam Ghosh, Avinash Joshi. The use of instantaneous symmetrical components for balancing a delta connected load and power factor correction[J]. Electric Power Systems Research, 2000 (54): 67-74.

[16] Iravani M R, Karimi-Ghartemani M. Online estimation of steady state and instantaneous symmetrical components[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 2003, 150(5): 616-622.

[17] 胡广书. 数字信号处理-理论、算法与实现 [M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 36-46.

收稿日期: 2010-02-04; 修回日期: 2010-04-03

作者简介:

赵建文 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电网安全与保护; E-mail: xkdzhaojw@163.com

侯媛彬 (1953-), 女, 博士, 教授, 博师生导师, 研究方向为智能控制、安全技术及其工程。