

电压波动与闪变对架空线路损耗影响分析

陈子辉¹,许巧云¹,李辰盟¹,李皓²

(1. 江门供电局有限公司,广东 江门 529000;2. 广东工业大学,广州 510006)

Analysis of influence of voltage fluctuation and flicker of loss effects on overhead lines

CHEN Zihui¹, XU Qiaoyun¹, LI Chenmeng¹, LI Hao²

(1. Jiangmen Power Supply Bureau Co., Ltd., Jiangmen 529000, China;2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

摘要:为探讨架空线路在电压波动与闪变影响下的损耗,利用短线路模型,定性分析了架空线路各项损耗,在电压波动与闪变的国标规定范围内,设定波动幅值及波动频率步长,进行实验仿真,仿真结果表明:架空线路附加损耗与频率波动的一次方呈正相关,与幅值波动的一次方及三次方呈负相关比例,与幅值波动的二次方呈正相关比例,且正比于频率波动与幅值波动的乘积。最后给出了通过最小二乘多项式拟合技术计算线路损耗的方法,并运用Simulink模型验证其有效性。

关键词:架空线;电压波动与闪变;附加损耗;最小二乘法;多项式曲面拟合

Abstract: In order to discuss the energy efficiency of overhead lines under the influence of voltage fluctuations and flicker, the short line model is used to qualitatively analyze the various losses of overhead lines in voltage fluctuation and flicker. Within the scope of the national standard, the fluctuation amplitude and the fluctuating frequency step are set, and the simulation is carried out. The simulation results show that the additional loss of the overhead line is positively correlated with the primary of the frequency fluctuation, and negatively correlated with the primary and cubic of the amplitude fluctuation. The ratio is proportional to the square of the amplitude fluctuation and is proportional to the product of the frequency fluctuation and the amplitude fluctuation. Finally, the method of calculating line loss by least squares polynomial fitting technique is given, and the effectiveness is verified by Simulink model.

Key words:overhead line; voltage fluctuation and flicker; additional loss;least squares method;polynomial surface fitting

0 引言

随着我国经济水平与科学技术的不断发展与提高,对优质电能需求的不断增加,波动性负荷所占比例持续增加,对电压变化十分敏感的负载越来越多,给电网的电能质量带来新的威胁。电压波动与闪变作为电能质量的重要指标,日渐引起大家的关注^[1-2]。

目前,架空线路损耗的影响研究主要集中于考虑三相不平衡、谐波等电能质量因素^[3-4]。文献[5]—文献[6]描述了电压波动与闪变的测量方法和评估标准,文献[7]研究了电压波动与闪变对电能表的计量影响,文献[8]—文献[9]分析了风电场的电

压波动与闪变评估模型。然而,目前几乎没有文献考虑过电压波动与闪变对架空线路损耗的影响。

鉴于上述情况,本文从损耗的角度反映损耗,首先从理论上分析电压波动与闪变对架空线路损耗的影响,通过MATLAB仿真软件,根据架空线路的短线路模型,仿真出电压波动与闪变由轻到重时的架空线路损耗,并且与没有电压波动与闪变时的架空线路损耗进行对比,得出损耗增比;最后给出了通过最小二乘多项式拟合技术计算电压波动与闪变影响下的架空线附加损耗的方法,并运用Simulink模型验证拟合公式的有效性。

1 架空线路损耗

无电能质量影响下的架空线路传输过程中主要存在如下损耗:电阻损耗 ΔP_R 、电晕损耗 $\Delta P_{\text{电晕}}$ 和缘子泄漏损耗 $\Delta P_{\text{泄露}}$ 。

1.1 电阻损耗

架空线的电阻损耗是由于架空导线中存在电阻而导致的电能损失。它占架空输电线路损耗的

收稿日期:2020-05-16;修回日期:2020-07-22

基金项目:广东省科技计划资助项目(2016A010104016);广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172877)

This work is supported by Science and Technology Plan Fund of Guangdong Province (No.2016A010104016); Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20172877)

90%左右。则三相导线中的电阻损耗可表示为

$$\Delta P_R = 3I^2R = 3\left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \phi}\right)^2 \rho \frac{l}{A} = \frac{P^2 \rho l}{U^2 \cos^2 \phi A} \quad (1)$$

式中: R 为相导线电阻; ρ 为导线电阻率; l 为相导线长度; A 为导线截面积; P 为线路有功功率。

1.2 电晕损耗

架空线的电晕损耗是由于架空线上的电场强度过高,发展成局部放电而产生的损耗,可表示如下

$$\Delta P_{\text{电晕}} = \frac{2.1fU^2}{[\lg(s/r)]^2} F \times 10^{-5} (\text{kW/km}) \quad (2)$$

式中: f 为电源频率; r 为导线的实际半径; s 为线间距离; F 为与 $U/U_{\text{晕}}$ 有关的系数; U 为导线对地电压; $U_{\text{晕}}$ 为起始电晕电压。

1.3 绝缘子泄漏损耗

架空线路绝缘子泄漏损耗 $\Delta P_{\text{泄漏}}$ 是由于绝缘子发生闪络而引起的电能损耗。

通常,低于35 kV的架空线路不考虑绝缘子泄漏损耗,高于110 kV的架空线路的绝缘子泄漏损耗按架空线路电阻损耗的2%计算。

无电能质量因素影响下的线路总损耗公式为

$$\Delta P_L = \Delta P_R + \Delta P_{\text{电晕}} + \Delta P_{\text{泄漏}} \quad (3)$$

$$ef = \frac{P_1 - \Delta P_L}{P_1} \quad (4)$$

式中: ef 为线路损耗; P_1 为线路首端功率; ΔP_L 为无电能质量因素影响下的线路总损耗。

2 电压波动与闪变分析

电压波动是明显偏离额定值的快速电压变动,常用相对电压变动量 $d\%$ 来表示,即

$$d\% = \frac{\Delta U}{U_N} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (5)$$

式中: U_{\max} 为一系列电压均方根值变化中相邻极大值; U_{\min} 为极小值; U_N 为额定电压。

闪变是指由电压波动引起灯光闪烁的人眼视感反应,是波动频率在0.05–35 Hz时的一种现象。因此,电压波动与闪变在原理上是相同的电压质量问题。

在理论或工程实际中都把电压波动看成是某特殊频率与波形的调幅波对工频电压的基波进行的幅度调制,其数学表达式如式6所示

$$u(t) = U_m [1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

式中: U_m 为基波幅值; Ω 为调幅波角频率; ω 为基波角频率; $m = V_m/U_m$ 为调幅波调制系数; V_m 为调幅波幅值; φ 为基波初始相位角; f_u 为频率波动, $f_u = \frac{\Omega}{2\pi}$ 。

根据积化和差、和差化积公式,可将式(6)分解为

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m [1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t + \varphi) \\ &= U_m \cos(\omega t + \varphi) + \frac{U_m m \cos(\varphi)}{2} [\cos(\Omega t + \omega t) + \cos(\Omega t - \omega t)] - \\ &\quad \frac{U_m m \sin(\varphi)}{2} [\sin(\Omega t + \omega t) - \sin(\Omega t - \omega t)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Omega \pm \omega$ 通常不是基频的整数倍,而是分数倍,即间谐波。

对于间谐波,考虑集肤效应,线路的交直比通常可以通过含有实部和虚部的修正的贝塞尔函数来计算,计算公式如下

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} \approx 1.01 \times \left(1 + 2.8 \times 10^{-7} \times e^{-4(D_s/D)} \times \left[\frac{f}{1.609 \times R_{dc}} \right]^{1.818} \right) \quad (8)$$

式中: R_{dc} 为直流电阻; D_s 为钢芯线的直径; D 为整根导线的直径; f 为电源频率。

如果单相线路发生电压波动与闪变,幅值波动与频率波动对于单相线路的电压幅值与相角都会产生相应的影响,造成三相不平衡。如图1所示:

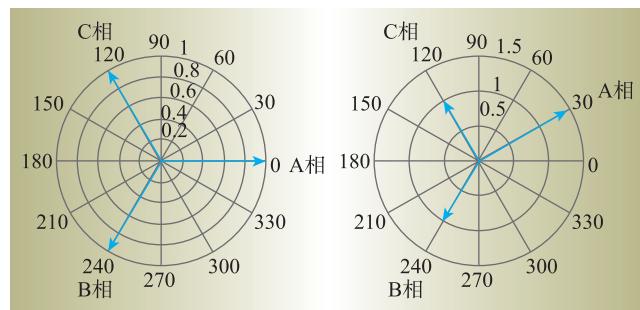


图1 电压波动与闪变造成的三相不平衡

Fig. 1 Three-phase imbalance caused by voltage fluctuations and flicker

由图1可得出,如果单相线路发生电压波动与闪变的幅值波动和频率波动不仅会产生间谐波,也会造成三相不平衡。

为量化考量电压波动与闪变对架空线路附加损耗增量的具体情况,本文用附加损耗及损耗增比的概念来表示如下

$$\Delta P_f = P' - \Delta P_L \quad (9)$$

$$\Delta P = \frac{P' - \Delta P_L}{\Delta P_L} \times 100\% = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_L} \times 100\% \quad (10)$$

式中: P' 为架空线路存在电压波动与闪变时的实际损耗; ΔP_L 为理想状态下,即无电能质量问题下架空线路的损耗; ΔP_f 为架空线路存在电压波动与闪变时的附加损耗。

有电压波动与闪变影响下的架空线损耗公式为

$$ef = \frac{P_1 - P'}{P_1} \quad (11)$$

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真模型参数

模型仿真试验选用架空线型号为LGJ-120/20,导线间几何均距为4.5 m,回路数为双回路。架空线路具体参数如表1所示^[10-11]。

表1 架空线路参数

Table 1 Overhead line parameters

参数	数值
相数	3
RLC频率/Hz	50
单位正序阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.416
单位零序阻抗/(Ω·km ⁻¹)	1.248
单位正序电感/(H·km ⁻¹)	0.933 7e ⁻³
单位零序电感/(H·km ⁻¹)	4.126 4e ⁻³
线路长度/km	10
计算半径/mm	6.18
负载容量/MVA	1

利用MATLAB平台中以表1的架空线参数建立仿真模型,考量和分析电压波动与闪变因素影响下的架空线路损耗及损耗。

3.2 电压波动与闪变仿真

人对闪变的最大感知频率范围不超过0.05~35 Hz^[12],因此本仿真中的调幅波频率控制在0~35 Hz。为探讨电压波动对架空线路附加损耗的影响规律,仿真的相对电压变动量控制在0~40%,即调制波m取0~0.2,基波源取有效值为10.5 kV的工频正弦电压源。

3.2.1 频率波动

对于所建立的仿真模型,选取其中一条线路作为研究对象,将调幅波设置为0.1 Hz,波动频率从0开始,按步长为0.1 Hz变化至35 Hz,仿真得到架空线路附加损耗以及损耗增比随调幅波频率的变化关系,如图2、图3所示。

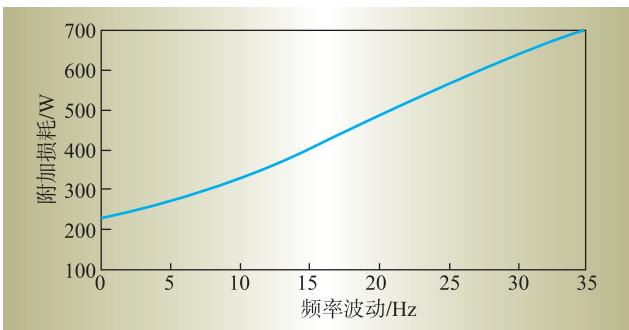


图2 幅值波动为0.1时的线路附加损耗

Fig. 2 Line additional loss when amplitude fluctuation is 0.1

频率波动造成的线路附加损耗及损耗增比的具体数据如表2所示。

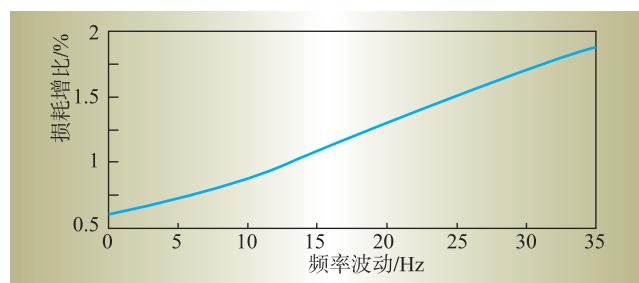


图3 幅值波动为0.1时的损耗增比

Fig. 3 Loss increase ratio when amplitude fluctuation is 0.1

3.2.2 幅值波动

选取一条仿真模型线路作为研究对象,考虑约为8.8 Hz的闪变频率是人的最大视觉敏感频率,故设置调幅波频率为8.8 Hz,调幅波从0开始,按步长为0.001 Hz变化至0.2 Hz,仿真得到架空线路附加损耗以及损耗增比随调幅波幅值的变化关系,如图4、图5所示。

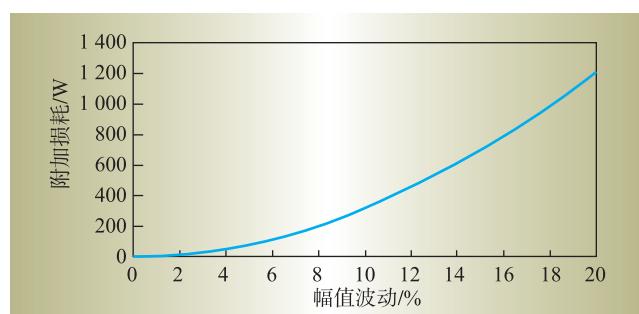


图4 频率波动为8.8 Hz的线路附加损耗

Fig. 4 Line additional loss with frequency fluctuation 8.8 Hz

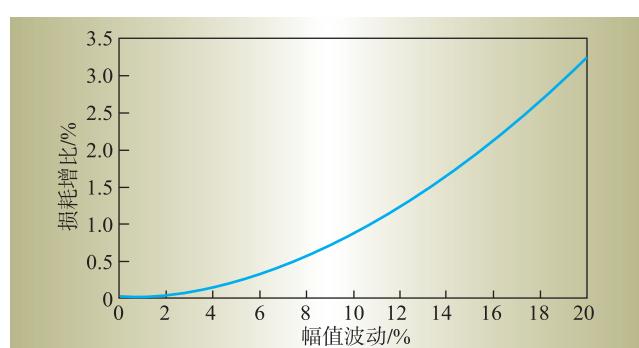


图5 频率波动为8.8 Hz的线路损耗增比

Fig. 5 Line loss increase ratio with frequency fluctuation 8.8 Hz

幅值波动造成的线路附加损耗及损耗增比的具体数据如表3所示。

表3 幅值波动造成的线路附加损耗及损耗增比

Table 3 Line additional loss and loss increase ratio caused by amplitude fluctuation

幅值波动/%	附加损耗/W	附加损耗率/%
5	80.31	0.22
10	315.14	0.81
15	696.29	1.87
20	1 216.62	3.27

3.2.3 幅值及频率波动

在之前建立的仿真模型上,同时考虑幅值及频率波动,2者的变化范围及变化步长均与3.2.1节和3.2.2节相同,架空线路附加损耗及损耗增比随电压波动与闪变参数变化趋势如图6、图7所示。

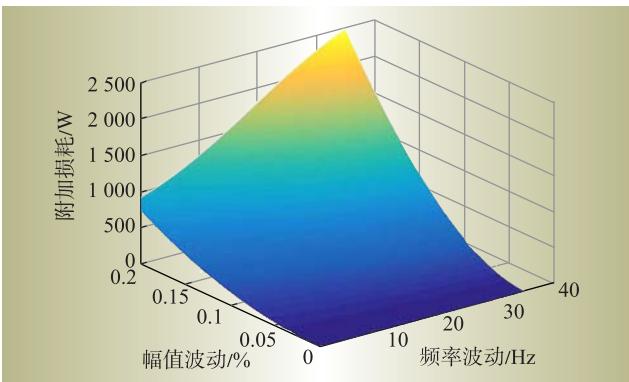


图6 线路附加损耗与电压波动的变化三维图

Fig. 6 3D variation of line additional loss and voltage fluctuation

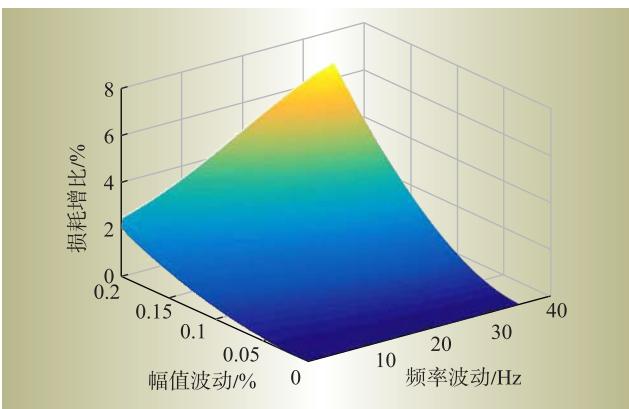


图7 损耗增比与电压波动的变化三维图

Fig. 7 3D map of loss increase ratio and voltage fluctuation

由图6、图7可知,随着幅值及频率波动的不断增大,附加损耗以及损耗增比的上升速度显著提升。具体数据如表4所示。

表4 电压波动与闪变造成的附加损耗及损耗增比

Table 4 Additional losses and loss increase ratio due to voltage fluctuations and flicker

频率波动/Hz	幅值波动/%	附加损耗/W	损耗增比/%
5	5	93.27	0.25
	10	296.33	0.79
	15	629.16	1.69
	5	133.96	0.36
	10	380.15	1.02
	15	778.32	2.09
10	5	178.63	0.48
	10	477.61	1.28
	15	953.87	2.56
	5	225.93	0.60
	10	583.49	1.57
	15	1 144.65	3.07
15	5	273.86	0.73
	10	690.40	1.85
	15	1 334.72	3.58
	5	319.92	0.86
	10	789.73	2.12
	15	1 507.92	4.05
20	5	361.52	0.97
	10	872.72	2.34
	15	1 647.65	4.42

由表4可知,频率波动从5 Hz增加到35 Hz时,相比于0.05的幅值波动的0.72%,幅值波动为0.15的损耗增比增加了2.73%;幅值波动从0.05增加到0.15时,相比于5 Hz的频率波动的1.44%,频率波动为35 Hz的损耗增比增加了3.45%。

4 基于最小二乘的多项式曲面拟合

由上述分析可得线路附加损耗随幅值波动与频率波动的变化关系曲面,运用基于最小二乘的多项式曲面拟合,可得出附加损耗的拟合公式,拟合过程如下:

(1) 建立数学模型:通过观察模型曲面,设数学模型如下

$$f(x, y) = a_0x + a_1y + a_2xy + a_3y^2 + a_4xy^2 + a_5y^3 \quad (12)$$

(2) 设置损失函数,即拟合误差函数如下

$$Loss = \sum_{i=1}^n [z_i - (a_0x + a_1y + a_2x^2 + a_3xy + a_4y^2 + a_5y^3)] \quad (13)$$

(3) 对上述每个系数求其偏导数为0,使损失函数最优化;

(4) 运用梯度下降法求解上述方程组,得其最优解,具体步骤为:(1) 将 a_0 ~ a_5 系数值初始化,再进行迭代;(2) 进行迭代后,求出各系数对应的梯度值;(3) 运用梯度值和学习率来更新各个系数如下

$$a_k = a_k + learn_rate \times gradient_a_k \quad (k=1\sim 5) \quad (14)$$

式中: $learn_rate$ 为学习率,取0.001; $gradient_a_k$ 为第 k 个梯度值。

(4) 保证每次更新所有系数,并且相应的损失函数值在减小,当损失函数值降低到设定值以下时,停止迭代,输出 a_k 。

将频率波动代入 x ,幅值波动代入 y ,线路附加损耗代入 $f(x,y)$,根据上述步骤拟合出下式

$$\Delta P_f = 4f - 935.2m + 58fm + 3.065 \times 10^4 m^2 + 954fm^2 - 3.075 \times 10^4 m^3 \quad (15)$$

式中: ΔP_f 为电压波动与闪变情况下的架空线路附加损耗; f 为频率波动值; m 为幅值波动值。

由式(15)可得,幅值波动与频率波动同时存在时,线路附加损耗受到两者的交互性影响,即损耗也受2者的交互性影响。

5 拟合公式验证

本文拟合的公式(15)通过建立 Simulink 模型仿真数据进行对比验证其有效性^[13]。Simulink 模型参数选择如表 1 所示,即 Simulink 模型参数与 matlab 模型参数选择一致。本文建立的 Simulink 模型如图 8 所示。将 Matlab 模型数据与 Simulink 模型数据对比可得表 5。

表 5 拟合公式数据验证

Table 5 Fitting formula data verification

幅值 波动/ 波动/ %	频率 HZ	附加损耗/W		误差/W A1-A2	误差率/% A1-A2 /A2×100%
		拟合公式	Simulink 模型数据 A1		
10 5	271.83	280.25	8.42	3.004	
10 10	330.65	307.68	22.97	7.465	
5 8.8	80.31	74.89	5.42	7.237	
10 8.8	315.14	309.42	5.72	1.848	

由表 5 可得,通过基于最小二乘的多项式曲面拟合所求的的架空线附加损耗计算公式与 Simulink

模型仿真所得的附加损耗误差在 10% 以内,可验证此拟合公式的有效性。

6 结束语

本文研究了电压波动与闪变影响下架空线路附加损耗和损耗增比,运用基于最小二乘的多项式曲面拟合方法,得出综合考虑频率波动及幅值波动交互性影响下的附加损耗公式,由此推导出架空线损耗与电压波动及闪变的关系。具体结论如下:

(1) 幅值波动不变时,架空线路附加损耗与频率波动呈正相关趋势;

(2) 频率波动不变时,架空线路附加损耗与幅值波动的一次方及三次方呈负比例关系,与幅值波动的二次方呈正比例关系;

(3) 架空线路附加损耗受到幅值波动与频率波动的交互性影响,2者任一项增加,都会导致附加损耗的进一步增大,即架空线路损耗降低。

(4) 架空线路损耗与幅值波动及频率波动呈负比例关系。

(5) 运用基于最小二乘法的多项式曲面拟合,可以得出架空线路附加损耗随电压波动与闪变变化的计算公式,为面对电压波动与闪变造成的附加损耗提供了解决方法,具有一定的参考价值。D

参考文献:

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10):5-12.
LIN Haixue. Basic problems of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10):5-12.
- [2] 肖湘宁,徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3):66-69.
XIAO Xiangning, XU Yonghai. Analysis of power quality

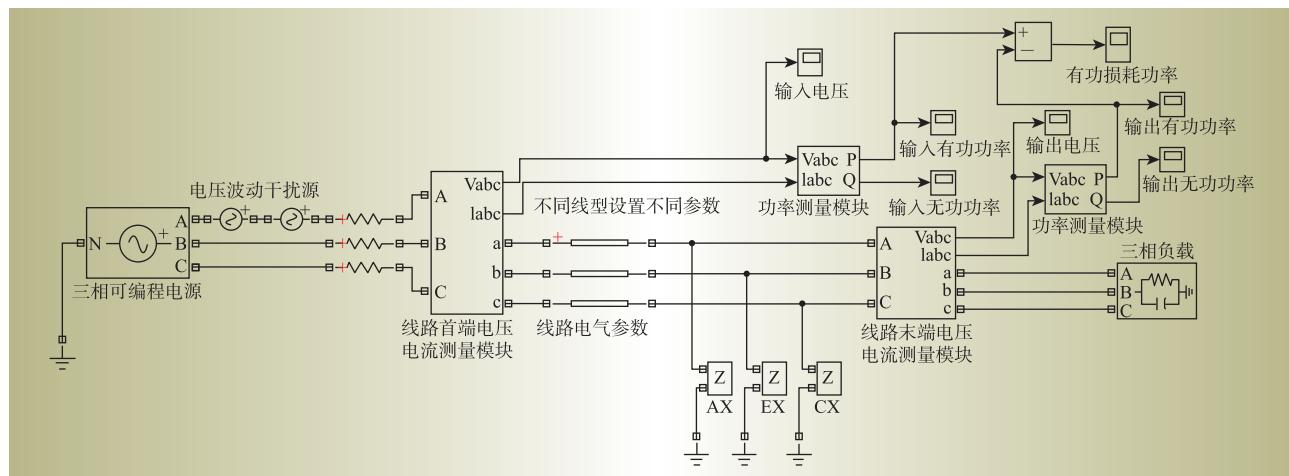


图 8 架空线电压波动与闪变 Simulink 仿真图

Fig. 8 Overhead line voltage fluctuation and flicker Simulink simulation diagram

- problems [J]. Power System Technology, 2001, 25 (3) : 66–69.
- [3] 张晓毅,贺惠民,李胜杰,等.三相不平衡造成的台区电能损耗分析[J].电力需求侧管理,2017(2):36–38.
ZHANG Xiaoyi, HE Huimin, LI Shengjie, et al. Analysis of power loss in the station caused by three-phase unbalance [J]. Power Demand Side Management, 2017 (2) : 36–38.
- [4] 曾惜,肖敏.三相负荷不平衡对线损的影响[J].贵州电力技术,2016,19(3):82–84.
ZENG Xi, XIAO Min. Influence of three-phase load imbalance on line loss [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(3):82–84.
- [5] 魏晓璞,徐永海,肖湘宁.电压波动与闪变检测方法综述[J].电测与仪表,2009,46(4):1–5.
WEI Xiaopu, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Review of voltage fluctuation and flicker detection methods [J]. Electric Measuring & Instrumentation, 2009, 46(4):1–5.
- [6] 郭晓丽,闫承志,陈劲操.电压波动和闪变实时检测的研究与实现[J].电测与仪表,2004,41(2):14–16.
GUO Xiaoli, YAN Chengzhi, CHEN Jincao. Research and implementation of real-time detection of voltage fluctuation and flicker [J]. Electric Measuring & Instrumentation, 2004, 41(2):14–16.
- [7] 赖思敏.电压波动与闪变对电能计量的影响[J].电力学报,2011(2):131–133.
LAI Simin. Influence of voltage fluctuation and flicker on energy metering [J]. Journal of Electric Power, 2011(2) : 131–133.
- [8] 张莉,孟克其劳,张占强,等.基于Matlab/Simulink的风力发电机组电压波动与闪变仿真分析[J].可再生能源,2016,34(2):214–219.
ZHANG Li, MENG Keqilao, ZHANG Zhanqiang, et al. Simulation analysis of wind turbine voltage fluctuation and flicker based on Matlab/Simulink [J]. Renewable Energy, 2016, 34(2):214–219.
- [9] 欧阳森,梁伟斌.大型风电场的电压波动与闪变预评
估建模研究[J].电气应用,2017(13):58–64.
OUYANG Sen, LIANG Weibin. Modeling of voltage fluctuation and flicker pre - evaluation for large - scale wind farms [J]. Electrical Application, 2017 (13):58–64.
- [10] 胡志坚,程小敏.输电线路零序阻抗参数测量方法[J].电力科学与技术学报,2010,25(3):25–31.
HU Zhijian, CHENG Xiaomin. Measurement method of zero sequence impedance parameters of transmission lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25 (3):25–31.
- [11] 梁志瑞,牛胜锁,靳楠.交流输电线路参数测量现状及发展趋势[J].电力系统自动化,2017,41(11):181–191.
LIANG Zhirui, NIU Shengsuo, YAN Nan. Current status and development trend of AC transmission line parameter measurement [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):181–191.
- [12] 屠金玲.电压波动与闪变的检测和抑制[D].济南:山东大学,2013.
TU Jinling. Detection and suppression of voltage fluctuation and flicker [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [13] 赵琳,杨乃琪,张秀峰.基于MATLAB/SIMULINK的电压波动及闪变测量研究[J].自动化与仪器仪表,2012 (5):30–32.
ZHAO Lin, YANG Naiqi, ZHANG Xiufeng. Research on voltage fluctuation and flicker measurement based on MATLAB/SIMULINK [J]. Automation & Instrumentation, 2012(5):30–32.

作者简介:

陈子辉(1976),男,广东台山人,学士,高级工程师,研究方向为电气试验技术管理;

许巧云(1979),女,广东阳江人,学士,高级工程师,研究方向为电力系统及自动化;

李辰盟(1988),男,陕西合阳人,学士,高级工程师,研究方向设备监测评价;

李皓(1994),男,江西赣州人,硕士,研究方向为需求侧管理。

(责任编辑 水 鸽)

(上接第38页)

- [6] 张勇军,石辉,翟伟芳,等.基于层次分析法-灰色综合关联及多灰色模型组合建模的线损率预测[J].电网技术,2011,35(6):71–76.
ZHANG Yongjun, SHI Hui, ZHAI Weifang, et al. Line loss rate prediction based on combinatorial modeling by analytic hierarchy process - gray comprehensive relationship and multi grey models [J]. Power System Technology, 2011, 35(6):71–76.
- [7] 刘金福,于达仁,胡清华,等.基于加权粗糙集的代价敏感故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2007,27 (23):93–99.
LIU Jinfu, YU Daren, HU Qinghua, et al. Cost-sensitive fault diagnosis based on weighted rough sets [J]. Proceed-

ings of the CSEE, 2007, 27(23):93–99.

作者简介:

卢德龙(1992),男,江苏新沂人,硕士,主要从事线损治理、综合能源服务工作;

王巨灏(1973),男,江苏苏州人,高级技师,主要从事计量检测检验工作;

张颖(1978),女,江苏苏州人,学士,主要从事营销业务质量管控工作;

黄馨仪(1992),女,福建南平人,硕士,主要从事用电信息采集工作;

吴阳(1995),女,河北秦皇岛人,博士,主要从事基于数据驱动的电力设备故障诊断工作。

(责任编辑 水 鸽)