

小电流接地系统间歇性弧光接地过电压 影响因素分析

姜磊, 石勇, 李宇琦

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 弧光接地过电压作为小电流接地系统中最常见的内部过电压之一, 对电力系统的安全稳定运行产生巨大威胁。弧光过电压的产生往往伴随着间歇性, 通过分析间歇性弧光过电压的暂态特征以及影响因素能够为防治该现象提供必要的参考。为此, 考虑了包括电弧重燃时刻、燃弧时长、熄弧时长、电弧电阻在内的几个不同影响因素, 通过搭建中性点不接地系统的仿真平台分析间歇性弧光接地过电压的暂态特征, 并对比各影响因素的作用程度。结果表明在中性点不接地系统的间歇性接地能够产生明显的过电压, 并且过电压的幅值主要受重燃时刻和电弧电阻影响, 而燃弧时长、熄弧时长对过电压幅值影响较小。

关键词: 小电流接地系统; 弧光过电压; 间歇性; 影响因素

中图分类号: TM 864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)02-0045-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240208

Analysis of Influencing Factors on Intermittent Arc Grounding Overvoltage in Small Current Grounding System

JIANG Lei, SHI Yong, LI Yuqi

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: As one of the most common internal overvoltages in small current grounding system, arc grounding overvoltage poses a great threat to the safe and stable operation of power system, and the generation of arc overvoltage is often accompanied by intermittency. The analysis of transient characteristics and influencing factors of intermittent arc overvoltage can provide a necessary reference for preventing and controlling this phenomenon. For this reason, several different influencing factors are considered, including arc reignition time, arc duration, arc extinction time and arc resistance. By building a simulation platform for ungrounded neutral system, the transient characteristics of intermittent arc grounding overvoltage are analyzed, and the effects of various influencing factors are compared. The results show that the intermittent grounding in ungrounded neural system can produce obvious overvoltage, and the magnitude of overvoltage is mainly affected by the reignition time and arc resistance, while the arc duration and arc extinction time have little influence on the magnitude of overvoltage.

Key words: small current grounding system; arc overvoltage; intermittency; influencing factors

0 引言

当前小电流接地系统广泛地应用于 6~66 kV 配电网中, 其主要优点是当系统发生单相接地故障时, 因故障电流为幅值较小的系统分布电容电流且线电压保持对称, 系统可以继续运行一段时间, 保证供电可靠性。但随着电网线路增多、加长, 系统对地

分布电容增加, 单相接地故障电流越来越大, 导致许多瞬时的单相接地故障不能自动灭弧, 电弧在故障点不断重燃和熄灭。这种间歇性的电弧容易引起系统中电磁能量振荡, 在故障相和非故障相上产生严重的暂态过电压, 威胁系统的安全稳定运行^[1-2]。

现有针对间歇性弧光过电压的研究, 一方面集中在电弧模型的建立以及其暂态特征的研究, 主要采用“黑盒模型”进行建模^[3], 将电弧视为一个“黑

盒”,忽略电弧内部复杂的物理过程,利用试验确定电弧内部特性参数随电弧状态的变化规律,进而建立电弧模型。如文献[4]建立了基于 Mayr 电弧模型和 Cassie 电弧模型的组合电弧模型;文献[5]建立了基于 Mayr 的动态电弧模型;文献[6]建立了基于 Schwarz 和控制论的电弧仿真模型。另一方面是进行了大量弧光过电压的实测和仿真研究,实测中发现过电压的最大倍数不超过 3.4 pu^[7]。在影响过电压因素的研究中,文献[8-10]仿真定性地分析了系统参数、重燃次数、失谐度等对过电压的影响;但对弧光过电压的间歇性随机特征考虑不足,主要以电弧在故障相幅值最大时重燃、电流过零时熄灭为前提条件进行了分析。

在上述研究的基础上,下面针对弧光过电压的间歇性随机特征,进一步充分考虑间歇性弧光接地发展过程中的不同影响因素,通过建立中性点不接地的小电流接地系统,定量地分析弧光过电压在不同电弧重燃时刻、燃弧时长、熄弧时长、电弧电阻等因素作用下呈现的特性,量化过电压峰值和倍数,对各因素的影响结果进行对比,以期确定影响过电压产生的关键因素。

1 基于工频熄弧理论的间歇性弧光过电压产生机理分析与仿真实验

对间歇性弧光过电压的机理研究主要建立在高频熄弧理论和工频熄弧理论,其区别在于熄弧的时刻不同。前者认为电弧在高频电流过零时熄弧,而后者认为在工频电流过零时熄弧^[1,11]。其中工频熄弧的结果更符合实际^[12],因此下面以工频熄弧理论分析间歇性弧光过电压的产生机理。

1.1 间歇性弧光过电压理论分析

根据图 1 所示的中性点不接地系统等效电路,分析工频熄弧理论下间歇性弧光过电压产生过程。

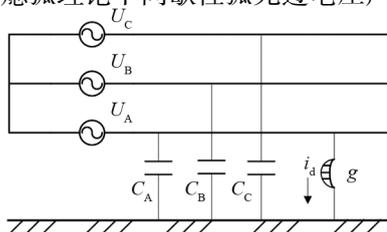


图 1 中性点不接地系统等效电路

图中三相对地电容对称 $C_A = C_B = C_C = C_0$, C_0 为单相对地电容,假设 A 相发生间歇性弧光接地, g 为接地电弧, i_d 为工频接地电流,过电压产生的过程如图 2^[13] 所示。

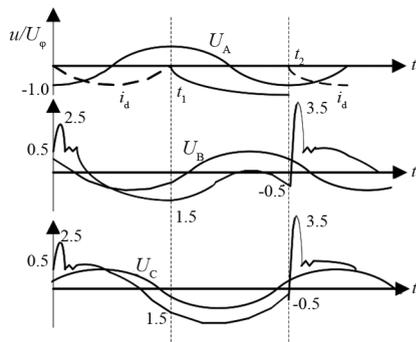


图 2 间歇性弧光过电压产生过程

1) $t=0$ 时,假设 A 相在额定电压峰值 $-U_\phi$ 时刻发生接地故障,非故障相在振荡过程中产生的过电压为 2 倍稳态值减去初始值,即为

$$U_B = U_C = 2 \times 1.5U_\phi - 0.5U_\phi = 2.5U_\phi \quad (1)$$

2) 经过半个工频周期,即 $t=t_1$ 时,接地电流过零电弧熄灭,电压恢复对称运行,B 相和 C 相的电压为 $-1.5U_\phi$ 。此时总的电荷在三相电容之间平均分配,形成三相电压的直流分量 U_D 。

$$U_D = \frac{Q}{3C_0} = \frac{-3C_0U_\phi}{3C_0} = U_\phi \quad (2)$$

在电弧熄灭后,各相稳态对地电压是由各相电源电压和所产生的直流分量叠加而成。

3) 再经过半周,即 $t=t_2$ 时,非故障相的电压为 $-0.5U_\phi$,故障相电压为 $-2U_\phi$,电弧重燃会使得非故障相的电压由初始值趋向于 $1.5U_\phi$,在该过渡过程中产生过电压,即

$$U_B = U_C = 2 \times 1.5U_\phi - (-0.5U_\phi) = 3.5U_\phi \quad (3)$$

通过上述理论分析可见,在工频熄弧理论下非故障相上过电压可能最高达 3.5 倍额定电压,故障相上过电压最高达 2.0 倍额定电压。

1.2 间歇性弧光过电压仿真实验

图 3 为典型 10 kV 配电网系统,共 4 条电缆出线,中性点采用不接地方式,系统电容电流约为 60 A。搭建基于 PSCAD 的仿真平台,模拟在出线 L_4 上发生间歇性弧光接地故障。

以工频熄弧理论为基础,假设在 A 相额定电压峰值时发生接地故障,经历 4 次燃弧、3 次熄弧后形成稳定的接地故障。由于电弧重燃的物理过程是系统恢复电压大于介质强度使绝缘击穿发生电弧接

地,否则电弧熄灭接地消失^[14]。因此采用开关S的闭合和断开模拟每半周的电弧重燃接地和熄灭接地消失。

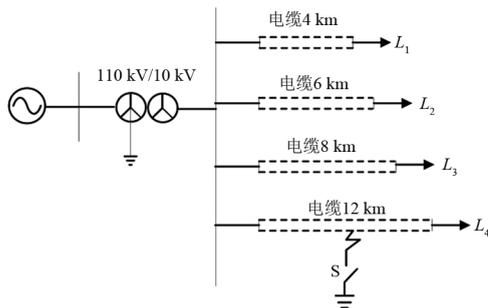


图3 10 kV中性点不接地系统仿真模型

此外,考虑恢复电压大于介质强度时就会造成绝缘击穿产生接地,因此在重燃时刻的选择上,主要考虑在电压峰值时最容易造成绝缘击穿,故选取电压峰值的时刻作为燃弧时刻。同样地,电流短暂过零期间,电弧输入能量为0,弧隙温度降低给熄弧创造了有利的条件,因此仿真时选取电流过零点时熄弧。表1为仿真中每次燃弧和熄弧时刻。

表1 燃弧和熄弧时刻仿真设置 单位:s

燃弧和熄弧阶段	燃弧时刻	熄弧时刻
第1次	0.915	0.925
第2次	0.935	0.945
第3次	0.955	0.965
第4次	0.975	—

图4为仿真得到的整个间歇性弧光接地过程中三相电压的变化情况。从图中可见,每次电弧重燃时系统均会发生振荡,进而引起过电压的产生。其中首次接地时,非故障相在暂态过程中产生过电压,C相电压可达17.16 kV。半周后电弧熄灭,三相电压短暂地恢复为正弦性,并且由于电荷的重新分配导致的直流分量使得三相电压波形整体下移。在0.935 s第2次燃弧后,非故障相的过电压达到

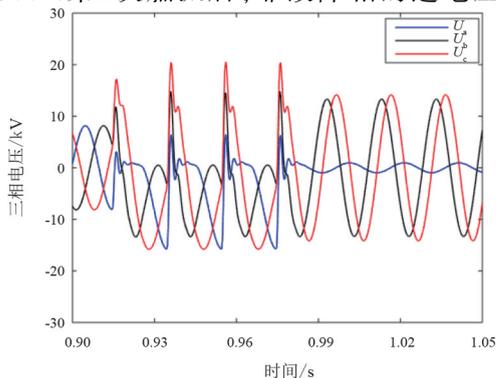


图4 间歇性弧光过电压波形

20.45 kV,同样地在熄弧后三相电压呈整体下移特性。此后每次燃弧后过电压暂态过程相似,过电压幅值基本保持不变。而在后期稳定的电弧接地阶段,非故障相电压接近线电压,其过电压倍数较间歇性燃弧期间相对较小。

表2为整个间歇性弧光接地期间各相电压所产生的过电压峰值与过电压倍数,其中过电压倍数基准值为 $10\text{ kV} \times \sqrt{2} / \sqrt{3}$,即8.165 kV。

表2 间歇性弧光接地过程中三相过电压

燃弧阶段	过电压峰值/kV(过电压倍数/(pu))		
	$ U_A $	$ U_B $	$ U_C $
第1次至第2次期间	15.79(1.93)	13.37(1.63)	17.16(2.10)
第2次至第3次期间	15.78(1.93)	15.83(1.91)	20.45(2.51)
第3次至第4次期间	15.74(1.93)	14.53(1.77)	20.56(2.52)
第4次燃弧后	0.95(0.12)	13.23(1.62)	13.58(1.66)

由表2可见,仿真得到的间歇性弧光接地过电压的产生过程与理论分析结果相符,但考虑到泄露、衰减和相间电容的影响,仿真下三相过电压略小于理论分析的结果。

2 考虑不确定性影响因素的间歇性弧光接地过电压仿真分析

基于工频熄弧理论的间歇性过电压本质上是一种简化分析,理想地假定故障发生在电压峰值时刻,并在电流过零点时电弧熄灭。而实际上,间歇性弧光接地的过程由于受电弧部分介质及大气条件等因素的影响,电弧的重燃和熄灭具有一定的随机性。现有的实测表明^[15],电弧重燃和熄灭的现象也不完全遵从周期性的半周规律。

为了更全面地了解不同影响因素下间歇性弧光接地过电压的特征,下面将过电压峰值和倍数作为衡量指标,对比电弧重燃时刻、燃弧时长、熄弧时长、电弧电阻4个影响因素下的仿真结果。

2.1 重燃时刻对间歇性弧光过电压影响

受介质绝缘恢复速度影响,电弧在首次熄灭后并不一定在电压峰值时刻,介质就有可能被击穿造成电弧重燃。为考虑电弧重燃时刻对间歇性弧光过电压的影响,改变第2次电弧重燃时刻分析过电压的特征。

仍假设在A相电压负半波最大值时($t=0.195\text{ s}$)发生单相接地故障,工频电流第1次过零点时熄弧。

仿真中设置如表 3 所示的不同电弧重燃时刻下的间歇性接地过程。

表 3 考虑重燃时刻的仿真设置 单位:s

仿真情形	第 1 次燃熄弧时刻		第 2 次燃熄弧时刻		重燃时刻
	燃弧	熄弧	燃弧	熄弧	
案例 1	0.915	0.925	0.932	0.945	0.932
案例 2	0.915	0.925	0.933	0.945	0.933
案例 3	0.915	0.925	0.934	0.945	0.934
案例 4	0.915	0.925	0.935	0.945	0.935

表 4 考虑重燃时刻下第 2 次重燃时三相过电压

重燃时刻/s	过电压峰值/kV(过电压倍数/(pu))		
	$ U_A $	$ U_B $	$ U_C $
0.932	12.03(1.47)	18.06(2.21)	14.84(1.82)
0.933	14.01(1.71)	18.19(2.23)	15.94(1.95)
0.934	15.33(1.88)	17.16(2.10)	18.92(2.32)
0.935	15.80(1.93)	15.84(1.94)	20.45(2.51)

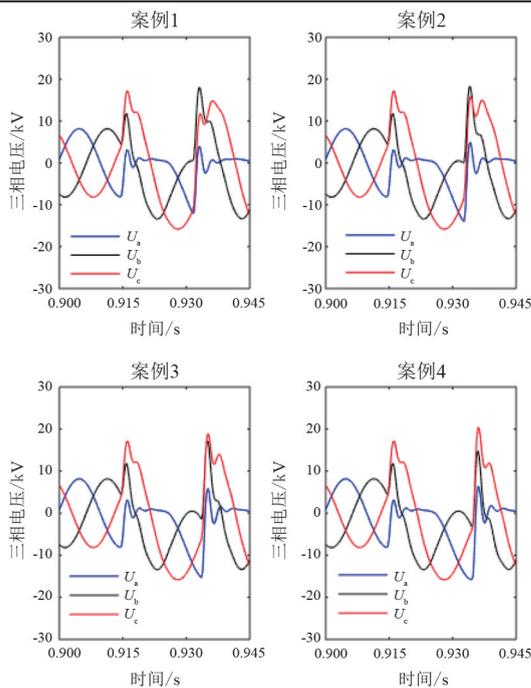


图 5 不同重燃时刻下三相电压波形

图 5 显示了 4 种重燃时刻下间歇性接地过程中三相电压波形,表 4 列出了不同重燃时刻下第 2 次重燃时三相电压的峰值和过电压倍数。可见过电压的峰值对于重燃时刻的变化较为敏感,随着重燃时刻越来越靠近故障相峰值时($t=0.935$ s),第 2 次重燃时导致的过电压越明显,其中对于非故障相 C 相,过电压峰值由重燃时刻 0.932 s 下的 14.84 kV 变化至 0.935 s 下的 20.45 kV,达到 2.51 倍的过电压倍数,相对升高了 37.8%。

2.2 燃弧时长对间歇性弧光过电压影响

实际电网中电弧可能不会在发生接地故障后电流第 1 次过零点时熄灭,而是会持续燃烧一段时间,经过几个周期后才熄弧,即电弧燃烧时长存在不确定性。为分析电弧燃烧时长对间歇性弧光过电压的影响,通过仿真设置第 1 次接地后电弧熄灭时刻,模拟不同的电弧燃烧时长。假设在 A 相电压峰值时发生接地,经过不同燃弧时长后熄灭,并在熄弧后的下一个电压峰值时刻发生重燃。仿真中模拟的间歇性接地过程如表 5 所示。

表 5 考虑电弧燃烧时长的仿真设置 单位:s

仿真情形	第 1 次燃熄弧时刻		第 2 次燃熄弧时刻		燃弧时长
	燃弧	熄弧	燃弧	熄弧	
案例 5	0.915	0.925	0.935	0.945	0.01
案例 6	0.915	0.935	0.945	0.955	0.02
案例 7	0.915	0.945	0.955	0.965	0.03
案例 8	0.915	0.955	0.965	0.975	0.04
案例 9	0.915	0.965	0.975	0.985	0.05
案例 10	0.915	1.015	1.025	1.035	0.10

图 6 为上述不同燃弧情况下间歇性接地过程中三相电压波形,可见若第 2 次重燃时故障相电压相位与第 1 次接地时相位相同时(同为电压负半波峰

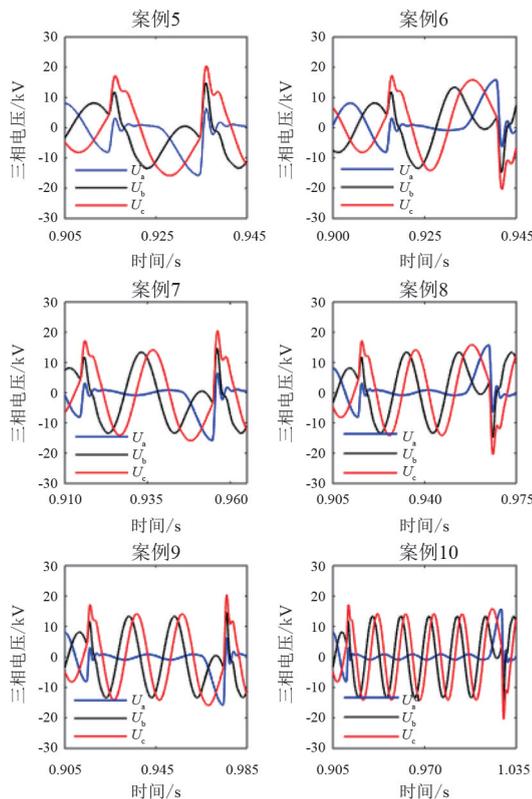


图 6 不同燃弧时长下三相电压波形

值,燃弧时长为 0.01 s、0.03 s、0.05 s),其电压整体向上移。如两次相位相反(第2次重燃发生在正半波峰值,燃弧时长为 0.02 s、0.04 s、0.10 s),则第2次重燃时电压呈下移趋势。

根据表6的第2次重燃时各相电压的峰值和过电压倍数可见,非故障相最大峰值电压可超过 20 kV。此外,尽管随着燃弧时长的改变,但对第2次重燃时过电压的值影响不大。

表6 考虑燃弧时长下第2次重燃时三相过电压

燃弧时长/s	过电压峰值/kV(过电压倍数/(pu))		
	$ U_A $	$ U_B $	$ U_C $
0.01	15.80(1.93)	15.78(1.94)	20.45(2.51)
0.02	15.79(1.93)	15.79(1.93)	20.44(2.50)
0.03	15.83(1.93)	15.78(1.93)	20.58(2.52)
0.04	15.82(1.94)	14.84(1.82)	20.46(2.51)
0.05	15.80(1.93)	14.85(1.82)	20.44(2.50)
0.10	15.82(1.93)	14.84(1.81)	20.46(2.50)

2.3 熄弧时长对间歇性弧光过电压影响

电弧在熄灭后可能不是在下一个电压峰值时重燃,而是经过若干个周期后重燃。为分析熄弧时长对间歇性过电压的影响,仿真中仍假设在A相电压负半波峰值时发生接地,经半个周期后熄弧,经过如表7所示的不同熄弧时长后发生第2次重燃。

表7 考虑电弧燃烧时长的仿真设置 单位:s

仿真情形	第1次燃熄弧时刻		第2次燃熄弧时刻		燃弧时长
	燃弧	熄弧	燃弧	熄弧	
案例11	0.915	0.925	0.935	0.945	0.01
案例12	0.915	0.925	0.945	0.955	0.02
案例13	0.915	0.925	0.955	0.965	0.03
案例14	0.915	0.925	0.965	0.975	0.04
案例15	0.915	0.925	1.015	1.025	0.09
案例16	0.915	0.925	1.025	1.035	0.10

根据图7所示的不同熄弧时长下间歇性接地过程的三相电压波形以及表8所示的第2次重燃时三相电压峰值情况可见,若第2次重燃时故障相电压与第1次发生接地时相位相反(熄弧时长为 0.02 s、0.04 s、0.10 s),则第2次重燃时不会产生明显的过电压,最短在 0.02 s 的熄弧时长内系统内暂态过电压就衰减完毕。并且第2次重燃时过电压的幅值基本不受熄弧时长影响。若第2次重燃时也是发生在故障相电压负半波峰值(熄弧时长为 0.01 s、0.03 s、0.09 s),重燃时会进一步产生明显的过电压,但随着熄弧时长的增加,过电压在两次燃弧间有衰减,过

电压幅值呈下降趋势。

表8 考虑熄弧时长下第2次重燃时过电压

重燃时刻	过电压峰值/kV(过电压倍数/(pu))		
	$ U_A $	$ U_B $	$ U_C $
0.01	15.80(1.93)	15.78(1.94)	20.45(2.51)
0.02	15.70(1.92)	15.07(1.85)	15.16(1.86)
0.03	15.71(1.92)	15.06(1.85)	18.86(2.31)
0.04	15.70(1.92)	15.07(1.85)	15.16(1.86)
0.09	15.70(1.92)	15.06(1.85)	17.72(2.17)
0.10	15.72(1.92)	15.06(1.85)	15.02(1.84)

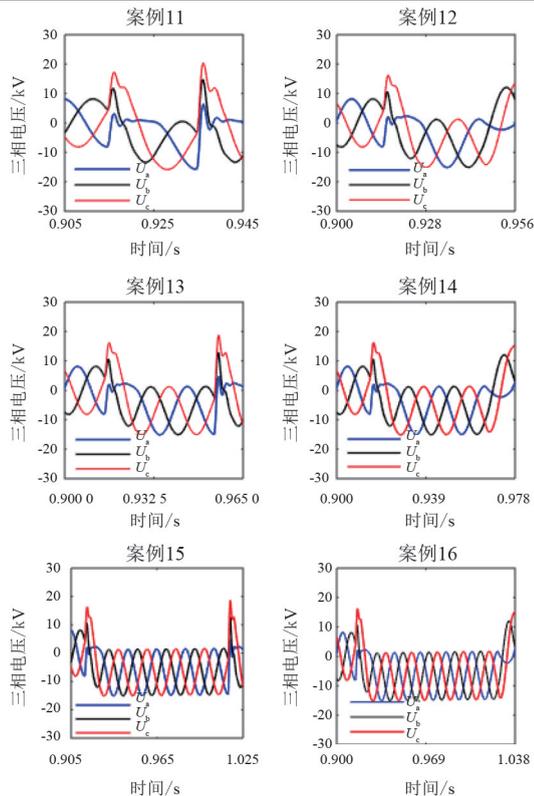


图7 不同熄弧时长下三相电压波形

2.4 电弧电阻对间歇性弧光过电压影响

文献[16]基于弧隙能量平衡理论,通过建立电弧模型,分析了电弧电阻的时变以及在重燃时呈低阻的特性,并且电弧电阻值主要受电弧时间常数和电弧稳态电导常数影响。该文献通过改变上述2个参数,得到电弧电阻的平均值为 1.68~38.05 Ω 。为分析电弧电阻值对间歇性接地过电压的影响,分别仿真电弧电阻为 1 Ω 、10 Ω 、20 Ω 、40 Ω (依次对应案例17—案例20)时三相电压的变化情况,仿真结果如图8、表9所示。根据表9的数据可知,电弧电阻越大,重燃时出现的过电压则越小。由于过渡电阻的阻尼作用和对自由电荷的释放作用,随着电阻的增大,系统最大过电压呈下降趋势。

表 9 考虑电弧电阻下第 2 次重燃时三相过电压

电弧电阻/ Ω	过电压峰值/kV(过电压倍数/(pu))		
	$ U_A $	$ U_B $	$ U_C $
1	15.10(1.85)	13.17(1.61)	18.79(2.30)
10	15.09(1.84)	11.99(1.50)	17.93(2.20)
20	15.08(1.84)	11.84(1.39)	17.37(2.13)
40	15.08(1.84)	11.58(1.18)	16.17(1.98)

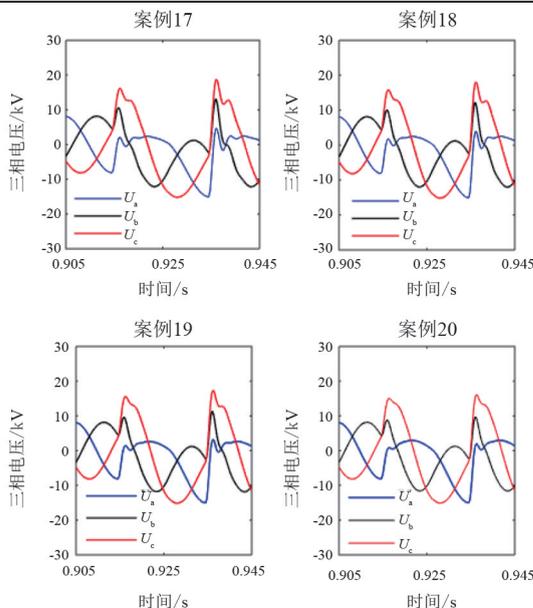


图 8 不同电弧电阻下三相电压波形

3 结 论

上面分析了中性点不接地系统的间歇性弧光过电压产生机理,并通过仿真验证了间歇性接地能够产生最高 2.52 倍额定电压的过电压。针对间歇性接地的不确定性,考虑电弧重燃时刻、燃弧时长、熄弧时长、电弧电阻 4 个影响因素分别进行仿真,得到如下结论:

- 1) 重燃时刻是影响过电压幅值的主要因素。重燃时故障相电压越大,其产生的过电压越大。
- 2) 燃弧时长对过电压的幅值影响较小。
- 3) 受熄弧时长影响,两次重燃时故障相相位相同时会产生较大的过电压,且随着熄弧时长的增加呈衰减特性;若两次重燃时相位相反,则不会产生明显的过电压。
- 4) 电弧电阻会影响过电压幅值,电弧电阻越小,产生的过电压越大。

参考文献

[1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电

力出版社,2009:64-69.

- [2] 毛卫华.弧光接地过电压的危害及消弧措施[J].电气应用,2008,27(10):49-51.
- [3] GOUDA O E, IBRAHIM D K, SOLIMAN A. Parameters affecting the arcing time of HVDC circuit breakers using black box arc model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(4): 461-467.
- [4] 杨明波,龙毅,樊三军,等.基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J].电测与仪表,2019,56(10):8-13.
- [5] 林莘,王娜,徐建源.动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J].中国电机工程学报,2012,32(16):157-164.
- [6] 许晔,郭谋发,陈彬,等.配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(7):57-64.
- [7] 张龙钦.现代配电网单相弧光接地过电压[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [8] 韩爱芝,曾定文,鲁铁成.配电网间歇性电弧接地过电压的仿真分析与对策[J].高压电器,2010,46(1):72-75.
- [9] 童奕宾,尤智文,李姝.小电阻接地系统间歇性弧光过电压分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(3):116-120.
- [10] 李淑蓉.小电流接地故障电弧建模及过电压分析[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [11] PERTERS J F, SLEPIAN J. Voltages induced by arcing grounds[J]. Journal of American Institute of Electrical Engineers, 1923, 42(8):781-792.
- [12] 束洪春.配电网故障选线[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [13] 于冰宇.孤东油区配电网过电压产生机理与抑制措施仿真研究[D].北京:中国石油大学,2016.
- [14] 顾荣斌.小电流接地电网单相电弧接地故障分析及仿真研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- [15] 周先谱,喻纯新,张兆璠.单相间歇性弧光接地过电压机理的研究(一)[J].煤矿机电,1991(5):6-14.
- [16] 王倩,谭王景,叶赞,等.基于 ATP-EMTP 的电弧接地故障的建模及仿真[J].电网与清洁能源,2015,31(1):16-21.

作者简介:

姜 磊(1993),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作;

石 勇(1978),男,硕士,教授级高级工程师,从事单相接地故障检测工作;

李宇琦(1987),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期:2023-09-25)