

基于 ZnO 非线性电阻的新型 消弧消谐策略研究

杨振宇¹, 钱敏慧¹, 陈宏钟², 胡永军², 赵剑锋¹

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 徐州市电力公司, 江苏 徐州 221003)

摘要: 首先, 阐述了配网中性点不接地系统产生弧光接地过电压和铁磁谐振过电压的机理, 针对 2 种过电压的产生机理, 提出采用氧化锌非线性电阻限压器投于系统故障相。对于弧光接地过电压, 限制其弧道恢复电压; 对于铁磁谐振过电压, 利用限压器吸收电压互感器的铁磁谐振能量, 使其退出饱和, 最终达到消除 2 种过电压的目的。在 PSCAD/EMTDC 中建立了间歇性弧光接地和限压器的简化仿真模型, 仿真结果证明了新策略消除弧光过电压和谐振过电压的有效性。

关键词: 中性点不接地; 弧光接地过电压; 铁磁谐振过电压; 限压器

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0016-04

0 引言

电力系统的消弧消谐是一个涉及电力系统多方面的综合性技术课题。我国配网为降低瞬时性故障跳闸率, 提高供电连续性, 其中性点采用不接地、经电阻接地、经消弧线圈接地等运行方式^[1-3]。中性点不接地方式简单、经济、供电可靠性较高, 但只适合电网电容电流较小情况; 中性点经小电阻接地方式, 虽能防止电网铁磁谐振过电压、抑制弧光过电压, 但其对防雷过电压不利, 降低了供电可靠性; 中性点经消弧线圈接地方式, 存在调谐麻烦、残流不易控制、消弧线圈安装不便等缺点。

为解决单相接地后流经故障点的电流较大, 电弧不易熄灭, 容易产生间隙性弧光接地过电压; 同时由于电磁式电压互感器铁芯饱和时容易引起谐振过电压, 导致事故跳闸率明显上升的现象, 同时发挥中性点经电阻接地和经消弧线圈接地的优点, 解决其不足, 本文在如何更有效地抑制电弧、避免弧光过电压和系统谐振方面, 进行了探讨。

1 抑制弧光过电压原理

1.1 弧光接地过电压机理

单相接地故障大多为弧光接地(如由雷击和鸟害等引起), 如图 1 所示。

由图 1 可知, 通过弧光的电流 I_{jd} 为健全相对地电容电流总和, 取电源相电压 U_φ , 得:

$$I_{jd} = I_b \cos 30^\circ + I_c \cos 30^\circ =$$

$$2\sqrt{3} \omega C_0 U_\varphi \cos 30^\circ = 3 \omega C_0 U_\varphi \quad (1)$$

中性点不接地系统弧光接地过电压其本质可用工频熄弧理论解释^[4], 如图 2 所示。

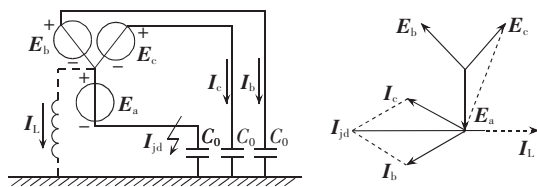


图 1 系统单相接地及相关电气矢量图

Fig.1 Single phase grounding fault and relevant electrical vectors

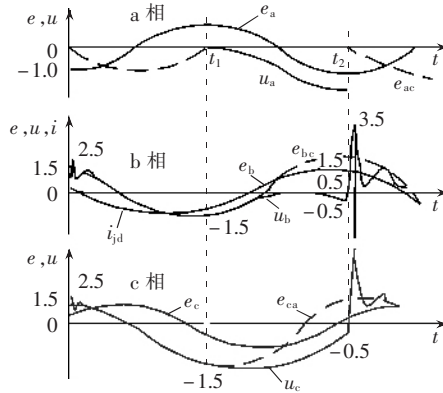


图 2 弧光接地过电压发展过程

Fig.2 Development process of arc grounding over-voltage

图中画出了电源相电压 e_a, e_b, e_c , 线电压 e_{ab}, e_{bc}, e_{ac} , 工频接地电流 I_{jd} 和各相对地电压 u_a, u_b, u_c 的波形, 取额定相电压 U_φ 作为基准。纵轴量为标么值。

设 a 相电压在幅值 $-U_\varphi$ 时对地闪络, 半个工频周期(T_1 时)后, b、c 相的电压等于 $-1.5 U_\varphi$, I_{jd} 通过零点, 电弧自动熄灭, 即发生了第 1 次工频断弧, 电网恢复对称运行。三相对地电容上电荷无处泄漏, 将在三相对地电容间平均分布, 形成三相电压的直流分量:

$$\frac{q}{3C_0} = \frac{-3C_0 U_\varphi}{3C_0} = -U_\varphi \quad (2)$$

断弧后,三相对地电压由各相电源电势和直流分量 $-U_\phi$ 叠加组成,b、c 相电源电势 $-0.5 U_\phi$,叠加后结果等于 $-1.5 U_\phi$,a 相电源电势为 U_ϕ ,叠加结果为零。

又经半个工频周期(T_2 时),a 相恢复电压则高达 $-2 U_\phi$,引起电弧重燃,其结果使 b、c 相电压从初始值 $-0.5 U_\phi$ 趋于线电压的瞬时值 $1.5 U_\phi$,从而产生更高的过电压 $2 \times 1.5 U_\phi - (-0.5 U_\phi) = 3.5 U_\phi$ 。

可见,此后每隔半个工频周期依次发生熄弧和重燃,过程与上面的完全重复,因此,健全相最大过电压为 $3.5 U_\phi$,故障相最大过电压为 $2 U_\phi$ 。考虑到各种衰减,实际过电压未必达到上述理论值。

1.2 消弧原理

系统发生弧光接地,电弧能否保持,主要取决于 2 个方面^[2]。

a. 流过弧道的电流强度和特性。若电弧电流很小,则电弧不易保持,一定条件下自行熄弧,系统恢复正常;若电弧电流中高频分量较大,即使残流较小,电弧也会持续保持。

b. 弧道两端的恢复电压 U_{hr} 与弧道介质抗电强度 U_{jr} 的相对关系。当电弧在电流过零熄灭后,弧道绝缘介质抗电强度在恢复,同时弧道两端的电压也在逐渐上升,如果能够保持弧道介质的抗电强度始终大于加在弧道上的电压,电弧就不会复燃,反之电弧就要持续下去。

消弧线圈利用原理 **a** 灭弧,但实际应用时还存在一定的缺陷,如:线路电容电流测量、计算复杂,消弧线圈无法抑制高频电弧等。

考虑利用原理 **b** 灭弧,当系统发生间歇性弧光接地时,向故障相投入一高能限压器(非线性电阻)^[5-7],使弧道恢复电压 U_{hr} 上升至设定值时不再上升。根据交流电弧理论,电弧电流过零后,若弧道介质恢复强度 U_{jr} 满足以下条件,则可熄弧。

$$U_{jr} > U_{hr} \quad (3)$$

限压器除了让 $U_{hr} > U_{jr}$,使得恢复电压的振荡幅值较低;还可在限压过程中吸收大量的电弧激励能量,对弧道起到很大的分流作用,使弧道恢复电压上升速度减缓,延长电弧重燃时间,以提高重燃电压幅值,进一步保证电弧的可靠熄灭,大幅提高了系统运行的安全性。

2 抑制铁磁谐振原理

2.1 铁磁谐振产生机理^[3]

中性点不接地系统中,为了监视绝缘,发电厂、变电所的母线上通常有 Y_g 接线的电磁式电压互感器(Y_g 型 TV),由于接有 Y_g 型 TV,网络对地参数除了电力导线和设备的对地电容 C_0 外,还有 Y_g 型 TV 励磁电感 L ,由于系统中性点不接地, Y_g 型 TV 的高压绕组,就成为系统三相对地的唯一金属通道。铁磁谐振原理如图 3 所示。

正常运行时,三相基本平衡,中性点位移电压很小。但在某些切除操作如断路器合闸或接地故障消失后,由于 TV 三相在扰动后电感饱和程度不一样而形成对地阻抗不平衡,它与线路对地电容形成谐振回路,可能激发引起铁磁谐振过电压。

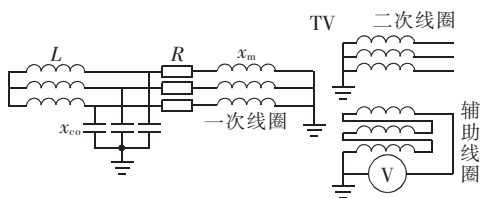


图 3 中性点不接地系统铁磁谐振原理示意图

Fig.3 Principle of ferromagnetic resonance in insulated neutral system

2.2 抑制铁磁谐振原理

抑制铁磁谐振,通常分一次、二次消谐^[8-9],下面结合实际,说明消谐原理。

一次消谐通过检测对零序电压的幅值和相位判断是否发生谐振,当系统发生非线性谐振时,将限压器短时投入系统,以降低并限制谐振电压,较低的电压使 TV 自动退出饱和区;同时限压器还将谐振能量迅速释放和吸收,使谐振立即消除。又因限压器阻值的非线性,使得谐振根本无法稳定振荡于某一频率,使系统自然脱离谐振状态。用该方法进行消谐,不仅迅速可靠,而且对系统无任何影响,同时还可以限制过电压,这是目前所有其他消谐装置所不具备的。

由于设备主要用于消弧,不允许频繁动作或长时间接于电网。因此,在短时消谐后即退出,此时若系统仍存在谐振故障,则装置立即投入二次消谐,即短时短接 TV 的二次开口三角绕组(通过一电阻)。该消谐方法与目前较流行的由二次消谐原理构成的微电脑消谐器类似,作为一次消谐的补充,是装置在一次消谐不充分情况下的后备保护,正常情况下一般不动作。

3 仿真分析

3.1 仿真建模

本文仿真工具采用 PSCAD / EMTDC Version 3.0.8^[10]。由于元件库中没有高能限压器和间歇性电弧接地模型,因此,验证高能限压器消弧消谐原理的正确性,关键在于建立合理的模型。

3.1.1 高能限压器建模

正常工作电压下,氧化锌(ZnO)非线性电阻其晶界层呈高电阻状态,若电流出现浪涌过电压时,其晶界层立即转变为低电阻状态,通过压敏电阻的电流急剧增大,即不管是正向电压还是反向电压,若超出它的稳定值后,都可使电压值得到稳定而电流聚生。此时,浪涌过电压能量转化为电阻体热能。当浪涌过电压过后,电压恢复正常,压敏电阻很快又恢复为高电阻状态^[6-7]。因此,由氧化锌非线性电阻构成的限压器伏安特性可简化为图 4 所示特性。

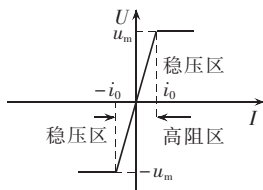


图 4 限压器简化伏安特性
Fig.4 Simplified V-A characteristic of voltage limiter

3.1.2 间歇性弧光接地建模

单相间歇性电弧接地按图 2 所示工频电弧理论建模,即在 a 相电源电压 e_a 从 $-U_\phi$ 到 U_ϕ 的半个工频周期经小电阻接地,接着的半个周期不接地,依次下去,如图 5 所示。

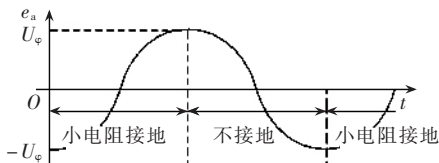


图 5 单相间歇性弧光接地模型

Fig.5 Model of single phase intermittent arc grounding

3.2 抑制弧光接地过电压仿真

3.2.1 仿真主电路

如图 6 所示,110 kV 电源接 Δ/Y 型变压器降压为 10 kV。初始状态,三相系统正常运行;0.2 s 时, a 相经小电阻间歇性接地(模拟间歇性弧光接地);0.3 s 时,投入限压器;0.5 s 时,退出限压器,仿真总时间 0.6 s。

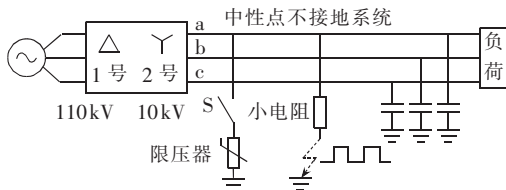


图 6 抑制弧光接点过电压仿真主电路

Fig.6 Main circuit of simulation for arc grounding over-voltage suppression

3.2.2 仿真结果

图 7 中, U_a 、 U_b 、 U_c 和 U_n 分别代表 a、b、c 三相及中性点对地电压, I_{jda} 为故障相 a 接地短路电流(下同)。

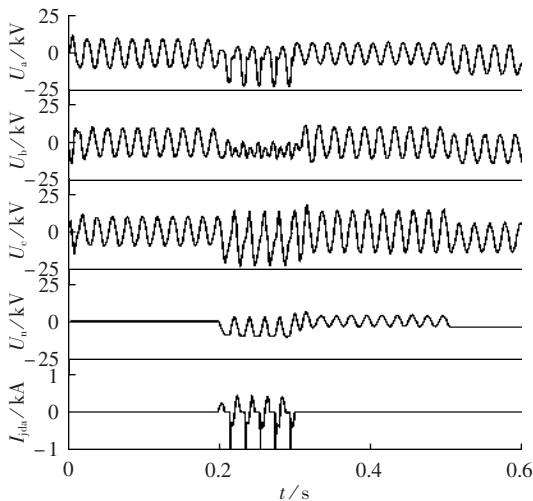


图 7 抑制弧光接地过电压仿真图

Fig.7 Simulation of arc grounding over-voltage suppression

3.2.3 仿真结果分析

- 0~0.2 s, 系统处于正常状态, 三相对称运行;
- 0.2~0.3 s, 系统 a 相发生间歇性电弧接地故障;

障, a、c 两相电压发生不同程度过电压, b 相虽不显著过压, 但发生严重畸变, 间歇性短路接地电流峰值高达 1 kA;

c. 0.3~0.5 s, 限压器投入 a 相, a 相电压限制在 50% 相电压内, 使得 a 相间歇性电弧接地故障被切除, 各相间歇性电弧过电压不同程度被抑制;

d. 0.5~0.6 s, 限压器被切除, 三相电压恢复正常, 但是中性点对地有一定的电压偏移。

3.3 抑制铁磁谐振过电压仿真

3.3.1 仿真主电路

如图 8 所示, 主电路与图 6 类似, 10 kV 线路上增加了 10 kV 到 100 V 的 Y_g 型 TV。初始状态, 三相系统正常运行; 0.1 s 时, a 相经小电阻间歇性接地(或金属性接地); 0.3 s 时, 接地故障被切除; 0.4 s 时, 投入限压器; 0.5 s 时, 退出限压器, 仿真总时间 0.6 s。

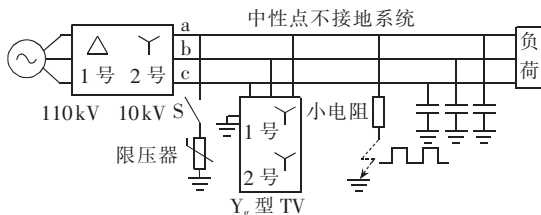


图 8 抑制铁磁谐振过电压主电路图

Fig.8 Main circuit of simulation for ferroresonance over-voltage suppression

3.3.2 仿真结果及分析

a. 0~0.1 s, 系统处于正常运行状态, 三相对称;

b. 0.1~0.2 s, 系统 a 相发生间歇性电弧接地(图 9)或金属性接地(图 10), b、c 两非故障相电压上升为线电压;

c. 0.2~0.4 s, 系统 a 相短路故障被切除, 但 TV 进入饱和状态, 与系统对地电容构成了铁磁谐振, 谐振过电压为 1.5 倍以上, 观察图 9、10, 此时的中性点对地电压波动频率不同, 说明不同接地类型的故障使得 TV 饱和程度不同;

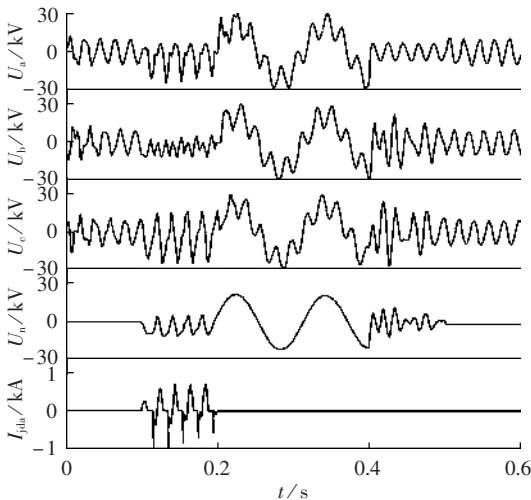


图 9 抑制铁磁谐振过电压仿真图(电弧接地)

Fig.9 Simulation of ferroresonance over-voltage suppression(arc grounding)

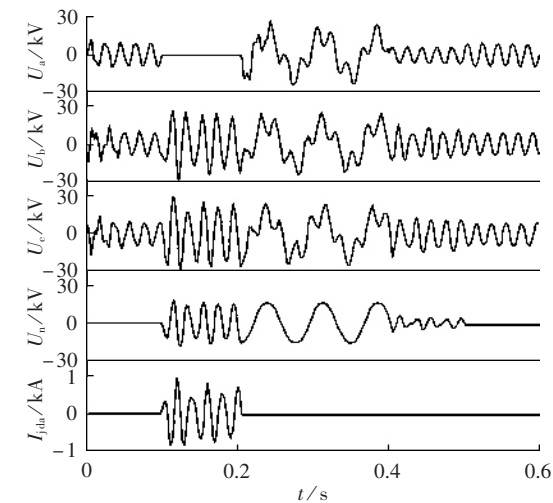


图 10 抑制铁磁谐振过电压仿真图(金属性接地)
Fig.10 Simulation of ferroresonance over-voltage suppression(metal grounding)

d. 0.4~0.5 s, 限压器投入 a 相, 铁磁性谐振过电压被抑制;
e. 0.5~0.6 s, 退出限压器, 系统三相电压基本恢复正常。

4 结语

本文论述了弧光接地过电压和铁磁谐振过电压的机理,并着重分析了利用由氧化锌非线性电阻构成的限压器消弧消谐原理,仿真结果证明其消弧消谐的有效性。

基于氧化锌非线性电阻的新型消弧消谐装置已经完成,并做了消除弧光接地过电压的测试,消除谐振过电压效果比较显著。仿真结果表明本装置对抑制铁磁谐振过电压也同样有效,待完善试验条件,测试其消谐性能。

参考文献:

[1] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
[2] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[3] 李景禄,周羽生. 关于配电网中性点接地方式的探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(8):85-86.
LI Jing-lu,ZHOU Yu-sheng. Study on neutral grounding modes of distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(8):85-86.
[4] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
[5] 中华人民共和国机械工业部. GB11032-2000 交流无间隙金属氧化物避雷器[S]. 北京:机械电子工业部,2000.
[6] 陈青恒,何金良,谈克雄,等. 氧化锌非线性电阻片微观结构及特性对电流分布的影响[J]. 中国电机工程学报,2002,22(8):62-66.
CHEN Qing-heng,HE Jin-liang,TAN Ke-xiong,et al. Influences of the microstructure on current distribution in ZnO varistors[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(8):62-66.
[7] 任文娥,于钦学. 氧化锌非线性电阻片的电容性与冲击性能关系的研究[J]. 电瓷避雷器,1999,14(5):31-33.
REN Wen-e,YU Qin-xue. Study on correlation between capacitance of ZnO varistor and its impulse properties[J]. Electromagnetic Arrester,1999,14(5):31-33.
[8] MARTI J R,SOUDACK A C. Ferroresonance in power system: fundamental solution[J]. IEE Proceedings,1991,138(4):321-329.
[9] 王晓云,李宝树,庞承宗. 电力系统铁磁谐振研究现状分析[J]. 电力科学与工程,2002,23(4):49-51.
WANG Xiao-yun,LI Bao-shu,PANG Cheng-zong. Research review on ferroresonance in power systems[J]. Electric Power Science and Engineering,2002,23(4):49-51.
[10] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术,2000,24(1):65-66.
LIN Liang-zhen,YE Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC [J]. Power System Technology,2000,24(1):65-66.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

杨振宇(1979-),男,江苏常州人,博士研究生,研究方向为电力电子技术电力系统中的应用(E-mail:yang_seu@eyou.com);
钱敏慧(1982-),女,江苏无锡人,Rockwell 实验室助理研究员,主要从事自动控制方面的研究;
陈宏钟(1967-),男,江苏徐州人,高级工程师,主要从事电力系统运行控制方面的研究;
胡永军(1974-),男,江苏徐州人,工程师,主要从事电力系统过电压防治工作;
赵剑锋(1972-),男,浙江临海人,副教授,主要从事电力电子技术在电力系统中应用的研究工作。

Study on arc and resonance elimination strategy based on ZnO varistor

YANG Zhen-yu¹,QIAN Min-hui¹,CHEN Hong-zhong²,HU Yong-jun²,ZHAO Jian-feng¹
(1. Department of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China;
2. Xuzhou Power Supply Company,Xuzhou 221003,China)

Abstract: Mechanisms of arc grounding over-voltage and ferroresonance over-voltage in insulated neutral systems are expatiated. Based on it,nonlinear ZnO varistor is applied in the system and connected with the fault-phase to suppress two kinds of over-voltage:for the arc grounding over-voltage,the ZnO varistor limits arc reverting-voltage;for the ferroresonance over-voltage,the ZnO varistor absorbs ferroresonance energy of voltage transformer and makes it deviate from saturated state. Models of intermittent arc grounding and voltage limiter are established in PSCAD/EMTDC, and simulation results testify the effectiveness of over-voltage suppression with proposed methods.
Key words: neutral insulation; arc grounding over-voltage; ferroresonance over-voltage; voltage limiter