

## 基于磁通分析的配电网 PT 二次消谐方法研究

王洪林, 王凯, 张琦雪, 陈俊, 王光

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**二次消谐装置在国内配电网系统中应用广泛,但部分现场应用效果不理想,存在消谐失败的情况。文中通过对配电网电压互感器(PT)谐振时的电压和磁通变化特征分析,提出了基于磁通变化规律的二次消谐控制新方法,即在零序磁通过零点时刻投入二次消谐回路,有效避免了PT非线性对二次消谐的影响,能够快速消耗谐振能量,使系统迅速恢复正常。针对实际系统中零序磁通无法测量的问题,提出了基于零序电压的零序磁通过零点识别方法,并通过仿真实验进行了验证。仿真结果表明,与常规的二次消谐相比,该方法能够有效提高二次消谐的成功率,减少二次消谐回路的投入时间和投入次数,降低消谐回路投入对系统运行的影响。

**关键词:**配电网;铁磁谐振;二次消谐;磁通变化;过零点

**中图分类号:**TM451

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2019)05-0170-07

### 0 引言

在中性点不接地配电网系统中,当发生合空载母线、单相接地故障消失或者负荷剧烈变化等情况时,如果电压互感器(potential transformer, PT)励磁电感发生非线性变化,可能会与系统对地电容形成参数匹配,从而引发铁磁谐振现象。铁磁谐振会引起系统过电压和电压互感器过电流,可能导致接地或相间故障,以及PT熔丝熔断、烧毁或爆炸,甚至导致避雷器爆炸、选线装置误动等故障,严重影响系统安全运行<sup>[1-5]</sup>。

二次消谐装置结构简单、使用方便,通过对PT二次电压信号的分析能够有效辨识出各种频率的铁磁谐振,当检测到谐振时,装置投入二次消谐回路进行抑制和消除<sup>[6-8]</sup>,在配电网系统得到了大量应用。目前,关于铁磁谐振及二次消谐已经有了较多研究,已有研究表明,二次消谐措施能够有效消除铁磁谐振故障<sup>[9-12]</sup>,但是需要在接地故障消失瞬间投入二次消谐回路,否则容易导致PT熔丝熔断或消谐失败,但是故障消失时刻很难准确获得,且铁磁谐振一般是在故障消失以后才产生,因此该方法难以在现场实际应用。现场使用过程中,二次消谐装置有时也会出现消谐失败的情况<sup>[13]</sup>。铁磁谐振作为一种非线性谐振,其规律分析在理论上十分复杂<sup>[14-15]</sup>,二次消谐回路的投入时刻、投入时长、消谐电阻大小都可能会对消谐效果产生影响。

文中通过对铁磁谐振过程中的磁通和电压特征分析,提出了一种基于磁通变化规律的二次消谐控制新原理及其实现方法,通过对二次消谐回路投

入时刻的精确控制,提高了二次消谐的成功率,并通过仿真和实验分析验证了所提方法的可行性。

### 1 配电网 PT 谐振过程中磁通和电压特征

发生铁磁谐振时,PT一次侧三相电压包括正常工频分量和谐振分量,三相电压 $U_A, U_B, U_C$ 可表示如下:

$$\begin{cases} U_A = U_{AN} + U_{AX} \\ U_B = U_{BN} + U_{BX} \\ U_C = U_{CN} + U_{CX} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}$ 为相电压正常工频分量; $U_{AX}, U_{BX}, U_{CX}$ 为相电压谐振分量。根据式(1)得到线电压如下:

$$\begin{cases} U_{AB} = (U_{AN} - U_{BN}) + (U_{AX} - U_{BX}) \\ U_{BC} = (U_{BN} - U_{CN}) + (U_{BX} - U_{CX}) \\ U_{CA} = (U_{CN} - U_{AN}) + (U_{CX} - U_{AX}) \end{cases} \quad (2)$$

铁磁谐振过程中,受到系统电源侧的影响,PT线电压仍为额定值,因此,式(2)中右侧的第二项一定为零。即有 $U_{AX} = U_{BX} = U_{CX} = U_X$ 。于是有:

$$\begin{cases} U_A = U_{AN} + U_X \\ U_B = U_{BN} + U_X \\ U_C = U_{CN} + U_X \end{cases} \quad (3)$$

不考虑互感器漏磁通及电阻压降,三相磁通为电压的积分处理结果,有:

$$\begin{cases} \Phi_A = \frac{1}{N} \int (U_{AN} + U_X) = \Phi_{AN} + \Phi_X \\ \Phi_B = \frac{1}{N} \int (U_{BN} + U_X) = \Phi_{BN} + \Phi_X \\ \Phi_C = \frac{1}{N} \int (U_{CN} + U_X) = \Phi_{CN} + \Phi_X \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N$ 为一次侧的绕组匝数; $\Phi_{AN}$ ,  $\Phi_{BN}$ ,  $\Phi_{CN}$ 为相磁通正常分量; $\Phi_X$ 为每相磁通的谐振分量。为了便于对零序回路的谐振分析,定义三相磁通之和为零序磁通,即:

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C}{3} = \frac{(\Phi_{AN} + \Phi_{BN} + \Phi_{CN}) + 3\Phi_X}{3} = \Phi_X \quad (5)$$

由式(2)、式(4)和式(5)可知,配电网系统铁磁谐振过程中,PT三相电压和磁通中的谐振分量完全相同,即谐振为零序性质,并且零序磁通即为谐振磁通。

电磁式电压互感器最常采用的铁芯材料为冷轧硅钢片<sup>[16]</sup>,属于软磁材料,其磁滞回线狭窄<sup>[17]</sup>。因此,如果不考虑PT绕组铁芯的磁滞特性,PT饱和时其励磁特性可以用 $i_L = \alpha\Phi + \beta\Phi^3$  ( $\alpha, \beta$ 为拟合系数,  $\Phi$ 为磁通)近似拟合。根据谐振过程中的电流电压关系,可以得到如下微分方程组:

$$\begin{cases} C_e \frac{dU_A}{dt} = \alpha\Phi_A + \beta\Phi_A^3 \\ C_e \frac{dU_B}{dt} = \alpha\Phi_B + \beta\Phi_B^3 \\ C_e \frac{dU_C}{dt} = \alpha\Phi_C + \beta\Phi_C^3 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_e$ 为各相对地电容。左右各自相加,并将式(4)带入,可得结果如下:

$$C_e \frac{d(3U_0)}{dt} = \alpha(\Phi_{AN} + \Phi_{BN} + \Phi_{CN}) + 3\alpha\Phi_X + \beta(\Phi_{AN}^3 + \Phi_{BN}^3 + \Phi_{CN}^3) + 3\beta\Phi_X(\Phi_{AN}^2 + \Phi_{BN}^2 + \Phi_{CN}^2) + 3\beta\Phi_X^2(\Phi_{AN} + \Phi_{BN} + \Phi_{CN}) + \beta\Phi_X^3 \quad (7)$$

三相磁通的正常分量对称,零序分量为零。即有 $\Phi_{AN} + \Phi_{BN} + \Phi_{CN} = 0$ ,上面等式可化简为:

$$C_e \frac{d(3U_0)}{dt} = 3\alpha\Phi_X + \beta(\Phi_{AN}^3 + \Phi_{BN}^3 + \Phi_{CN}^3) + 3\beta\Phi_X(\Phi_{AN}^2 + \Phi_{BN}^2 + \Phi_{CN}^2) + \beta\Phi_X^3 \quad (8)$$

式中: $\Phi_X$ 为谐振频率的交流流量; $\Phi_{AN}$ ,  $\Phi_{BN}$ ,  $\Phi_{CN}$ 为基波频率的交流流量。

因此,在实际发生铁磁谐振时,零序电压不仅包括谐振频率电压,还可能包括多种频率的高次谐波分量,如三倍频谐振频率分量、三倍频工频分量等。

## 2 基于磁通变化的二次消谐控制新方法

### 2.1 二次消谐基本工作原理

由前文分析可知,配电网PT铁磁谐振具有零

序性质,因此,二次消谐设备装设在PT绕组二次侧的零序回路。二次消谐工作原理及其等效电路分别如图1(a)和图1(b)所示。 $L_A, L_B, L_C$ 和 $L_a, L_b, L_c$ 分别为PT一次侧和二次侧的三相励磁电感; $R_Z$ 为二次消谐回路电阻; $L_{0m}$ 为电压互感器零序励磁电感; $C_0$ 为系统的零序对地电容; $K$ 为消谐回路导通控制开关; $R'_Z$ 为消谐回路电阻(折算到一次侧)。

铁磁谐振为发生在系统零序对地电容 $C_0$ 和电压互感器零序电感 $L_{0m}$ 之间的非线性LC振荡。正常情况下消谐回路不投入,开关 $K$ 保持断开状态,当检测到发生谐振时,二次消谐装置控制开关 $K$ 闭合,消谐回路与谐振回路并联,谐振能量通过消谐电阻消耗掉。为快速消除谐振,消谐回路电阻阻值一般很小。

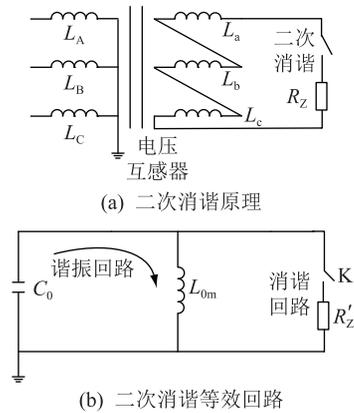


图1 二次消谐电路

Fig.1 Secondary resonance elimination circuit

### 2.2 基于磁通分析选择二次消谐投入时刻

根据式(4)可知,铁磁谐振过程中PT绕组相磁通包括正常磁通 $\Phi_{AN}$ ,  $\Phi_{BN}$ ,  $\Phi_{CN}$ 和谐振磁通 $\Phi_X$ ,如果能够消除谐振磁通 $\Phi_X$ ,则PT绕组退出饱和,铁磁谐振的条件不再满足,即可消除铁磁谐振。谐振磁通为交变分量,如果在谐振磁通的过零点投入二次消谐回路,由于二次消谐电阻阻值很小,零序电压会迅速降低,将谐振磁通 $\Phi_X$ 大小限制在零点附近,从而实现消谐。

为便于分析,分别对零序磁通(即谐振磁通)过零点时刻以及最大值时刻投入二次消谐回路的消谐过程进行分析。

零序磁通为零时,根据式(4)可知三相PT只包括正常磁通,因此均处于非饱和状态,励磁回路零序电感 $L_{0m}$ 很大,此时刻投入二次消谐回路,消谐回路电阻阻值很小,有 $\omega L_{0m} \gg R'_Z$  ( $\omega$ 为谐振角频率),可将励磁回路近似为开路,图1(b)可以简化为由零序电容 $C_0$ 和消谐回路电阻 $R'_Z$ 组成的RC放电回路。

放电回路时间常数  $\tau = R'_Z C_0$ , 消谐时间常数越小, 消谐速度越快, 二次消谐回路选取的电阻一般很小, 因此很短时间内就能消除谐振。

零序磁通最大时, 谐振能量集中在励磁回路零序电感, 零序电压近似为零。此时刻投入二次消谐回路, 由于系统对地电容一般很小, 容抗较大, 有  $1/(\omega C_0) \gg R'_Z$ , 可将电容回路近似为开路, 图 1(b) 可以简化为由励磁回路零序电感  $L_{0m}$  和消谐回路电阻  $R'_Z$  组成的 RL 放电回路, 其放电时间常数  $\tau = L_{0m}/R'_Z$ 。初始时刻 PT 绕组零序磁通最大, 励磁回路为饱和状态, 零序电感  $L_{0m}$  较小, 时间常数  $\tau$  较小, 放电很快。随着放电过程的进行, 励磁回路饱和程度不断降低, 励磁电感  $L_{0m}$  增大, 时间常数  $\tau$  也不断增大, 放电速度越来越慢。当励磁回路退出饱和区后, 励磁回路电流几乎为零, 放电过程基本停止。因此, 零序磁通很难减小到零。

根据上述分析可知, 零序磁通过零点投入二次消谐回路时, 谐振能量释放比较彻底; 而零序磁通最大值点投入二次消谐回路时, 由于 PT 励磁回路的非线性特性, 谐振放电时间很长, 谐振能量也很难彻底释放, 未释放完成的谐振能量可能重新激发铁磁谐振。因此, 零序磁通过零点导通二次消谐回路能够有效提高二次消谐的成功率, 缩短二次消谐的投入时间。

### 2.3 零序磁通过零点的获取方法

LC 线性谐振回路中, 磁通相位和电压相位相差  $90^\circ$ , 磁通的过零点即为电压的最大值点。然而, 由式(8)可知, 铁磁谐振过程中, 零序电压一般包括多种频率, 难以得到零序电压的最大值点。图 2 为某电厂厂变发生工频铁磁谐振时的零序电压波形及其频谱分析结果。

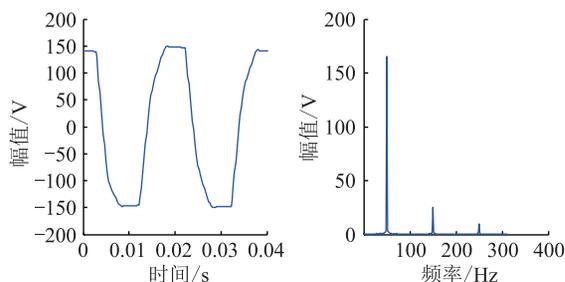


图 2 工频谐振电压波形

Fig.2 Waveforms of fundamental ferromagnetic resonance

由图 2 可知, 工频谐振零序电压不仅包括工频, 还包括三次、五次等奇数次谐波分量, 高次谐波的削顶作用使得零序电压的最大值与零序磁通的过零点并不完全对应, 因此无法通过电压瞬时值来获

取零序磁通的过零点。

设零序电压为:

$$U_0 = A_1 \sin(\omega t) + \sum_{k=1} A_{2k+1} \sin[(2k+1)\omega t] \quad (9)$$

零序磁通为:

$$\Phi_0 = -\frac{A_1}{\omega} \cos(\omega t) - \sum_{k=1} \frac{A_{2k+1}}{(2k+1)\omega} \cos[(2k+1)\omega t] \quad (10)$$

根据式(10)可知,  $\omega t = (2l+1)\pi/2$  ( $l=1, 2, 3, \dots$ ) 时  $\Phi_0 = 0$ , 而此时  $U_0$  的基波分量  $A_1 \sin(\omega t)$  绝对值最大, 据此可根据零序电压的瞬时值获取零序磁通的过零点时刻。详细逻辑如图 3 所示。

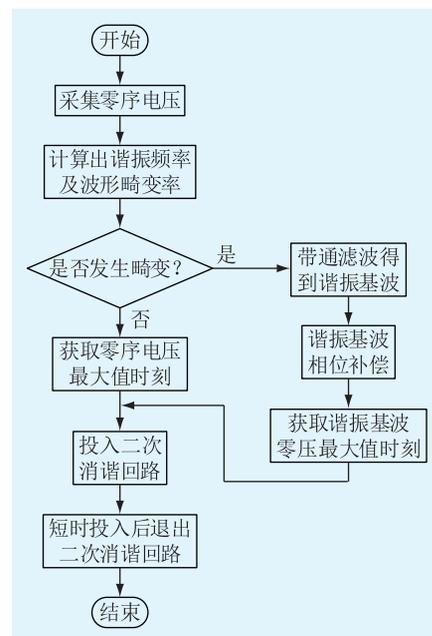


图 3 零序磁通过零点获取方法

Fig.3 Logic diagram of getting zero crossings of zero sequence flux

发生铁磁谐振时, 首先计算零序电压是否发生畸变, 当未发生畸变或者畸变很小时, 直接将零序电压的最大值时刻作为零序磁通的过零点, 并投入二次消谐回路; 当零序电压畸变较大时, 首先对零序电压进行带通滤波滤出谐振基波, 然后对滤波后的数据进行相位补偿, 保证滤波后的基波相位与滤波前相同, 根据补偿后零序电压的最大值时刻作为零序磁通的过零点, 并投入二次消谐回路。

### 3 仿真分析

为研究铁磁谐振过程中磁通的变化规律及对消谐过程的影响, 在 RTDS 仿真平台上搭建典型配电网及消谐系统如图 4 所示。

系统包括 1 台 110 kV/10 kV 主变, 主变接线方

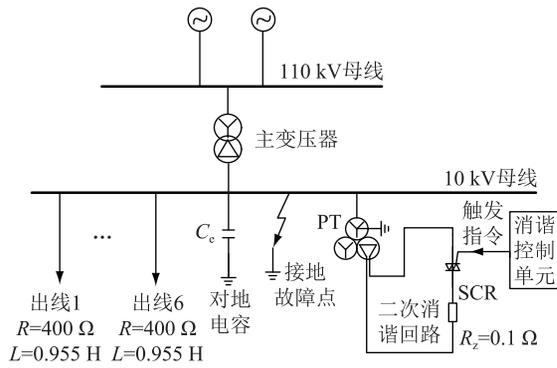


图4 RTDS 消谐仿真模型

Fig.4 Simulation model of ferromagnetic resonance elimination

式 YD-11,主变高压侧为无穷大电源,低压侧接入到 10 kV 母线。10 kV 母线包括 6 条出线,每条出线负载由三相对称的电阻和电感组成。10 kV 母线电压互感器由 3 个带饱和特性的单相变压器模型组成,互感器变比  $(10/\sqrt{3})/(0.1/\sqrt{3})/(0.1/3)$  kV,容量  $100 \text{ V}\cdot\text{A}$ ,励磁电流  $I_m = 0.1\%I_N$  ( $I_N$  为互感器额定电流),漏感(一次侧和二次侧)  $L_\sigma = 2.0\%L_m$  ( $L_m$  为互感器励磁电感)。电压互感器原边中性点接地,副边三相绕组首尾相接组成开口三角接线方式,开口三角出口处并联消谐回路,消谐回路电阻  $R_z$  为  $0.1 \Omega$ ,消谐回路可通过消谐控制单元控制其投退。系统对地电容  $C_e$ ,大小可根据需要进行调整。铁磁谐振通过单相接地故障消失来激发。

根据 H. A. Peterson 对铁磁谐振的研究结果,铁磁谐振的产生以及谐振频率与电压互感器感抗  $X_m$  和系统容抗  $X_{C0}$  相关<sup>[18]</sup>,  $X_{C0}/X_m$  越大,发生铁磁谐振的频率越高,即在电压互感器感抗不变的情况下,系统对地电容越大,谐振频率越小。根据该结论,在仿真模型中选择不同对地电容值进行试验。试验结果发现,对地电容  $C_e = 0.001 \mu\text{F}$  时,容易激发三倍频谐振,对地电容  $C_e = 0.01 \mu\text{F}$  时,容易激发工频谐振,对地电容  $C_e = 0.1 \mu\text{F}$  时,容易激发二倍频谐振。以这 3 种不同频率铁磁谐振为例进行仿真。

### 3.1 零序磁通过零点的获取

根据第 2.3 节提供的方法,设计带通滤波器,并根据滤波器的相位延迟进行适当的相位补偿,以工频铁磁谐振为例,谐振过程中零序磁通波形、零序电压波形、处理后的零序电压波形如图 5 所示。经过处理后的零序电压只包括谐振频率分量,且波形相位与滤波处理前波形基本一致,处理后波形的最大值和零序磁通的过零点基本在同一时刻(如  $t_1, t_2$  时刻所示)。

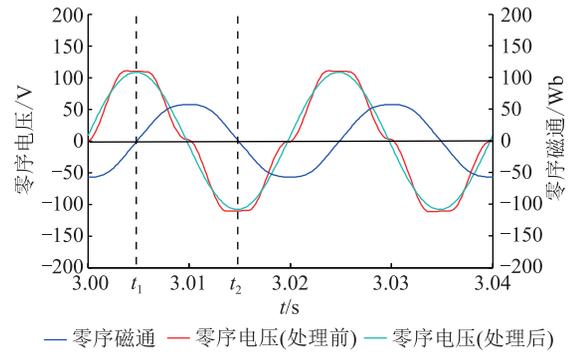


图5 零序电压及磁通仿真波形

Fig.5 Waveforms of zero sequence voltage and flux

### 3.2 零序磁通过零点消谐仿真结果

图 6 分别为二倍频谐振、工频谐振、三倍频谐振时在零序磁通过零点投入消谐回路时零序电压和零序回路磁通的变化波形,二次消谐回路投入 0.2 s 后退出。

根据图 6 的仿真结果分析,在零序磁通的过零点投入二次消谐回路时,消谐过程中零序电压迅速减小为零,零序磁通在零附近基本不变,消谐回路退出后,零序磁通、电压、电流均恢复正常,铁磁谐振顺利消除。

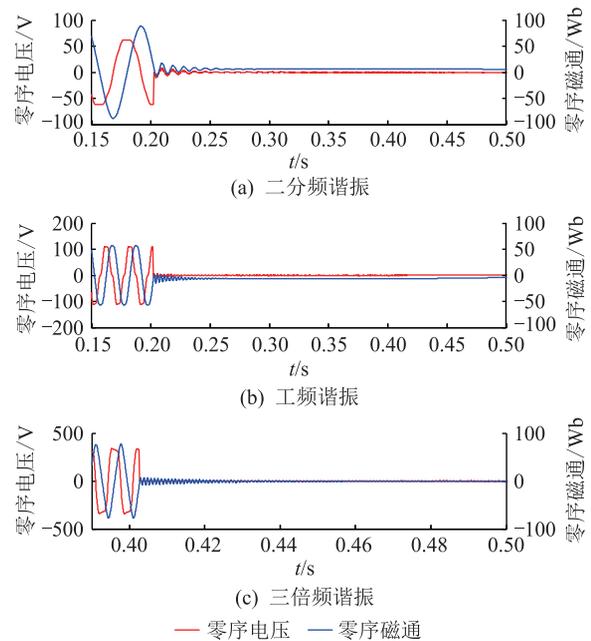


图6 零序磁通过零点投入二次消谐 ( $\Delta t=0.2 \text{ s}$ )

Fig.6 Waveforms when the elimination loop is triggered at the zero crossing of zero sequence flux ( $\Delta t=0.2 \text{ s}$ )

零序磁通最大值点投入消谐回路,投入持续时间 0.2 s,波形如图 7 所示。消谐回路投入时,零序磁通从最大值逐渐减小,但减小速度越来越慢;消谐回路退出后,零序磁通仍然较大,在零序磁通的作用下重新产生零序电压。对于二倍频谐振,消谐

回路退出后零序电压会产生频率和幅值均较小的低频振荡。对于工频谐振和三倍频谐振,消谐回路退出后重新产生的零序电压较大,经过一段时间后重新形成稳定的铁磁谐振。

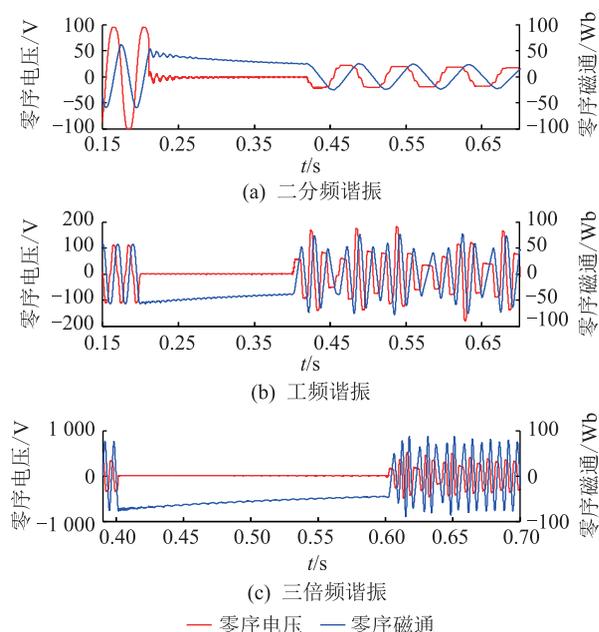


图7 零序磁通最大点投入二次消谐 ( $\Delta t=0.2$  s)

Fig.7 Waveforms when the elimination loop is triggered at the biggest value of zero sequence flux ( $\Delta t=0.2$  s)

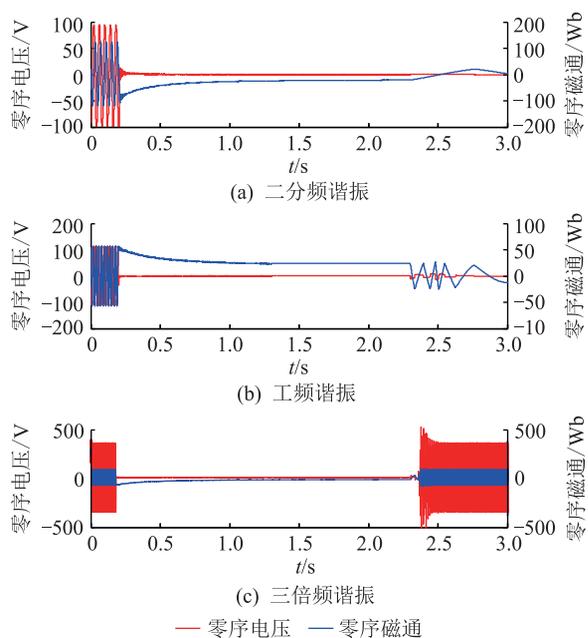


图8 零序磁通最大点投入二次消谐 ( $\Delta t=2$  s)

Fig.8 Waveforms when the elimination loop is triggered at the biggest value of zero sequence flux ( $\Delta t=2$  s)

若零序磁通最大值点投入消谐回路,投入持续时间 2 s,则波形如图 8 所示。在消谐回路退出后,零序磁通仍未减小到零,但三相绕组基本已退出饱和

和,二分频谐振、工频谐振得以消除,三倍频谐振重新产生较大的零序电压,形成新的谐振。

由仿真结果可知,采用零序磁通过零点投入二次消谐与零序磁通最大值点投入二次消谐相比有如下优点:

(1) 前者消谐过程更短,不超过 200 ms 即可消除各种频率的铁磁谐振,而后者需要 2 s 以上才能勉强消除分频和工频谐振,对于高频谐振则需要更长的消谐过程。

(2) 前者消谐过程完成后零序电压、零序磁通均恢复正常;后者即使消谐完成后零序磁通仍不为零,消谐回路退出后剩余的零序磁通会导致低频振荡,并且可能重新激发起谐振。

#### 4 现场故障数据分析

图 9 为青海某 35 kV 变电站发生三分频铁磁谐振以及消谐过程的波形图。由于实际运行过程中电压互感器的磁通量无法监测,因此用零序电压积分计算结果近似模拟零序磁通。

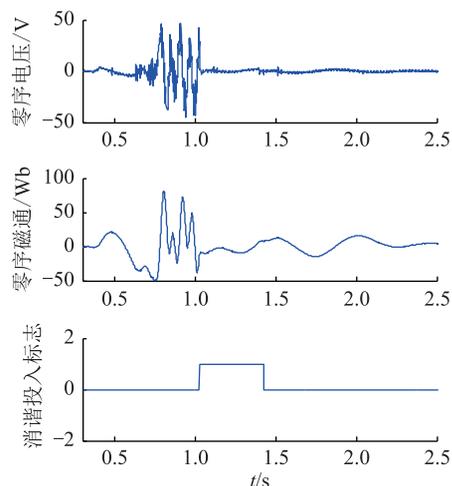


图9 某变电站 35 kV 母线消谐波形

Fig.9 Waveforms of secondary resonance elimination of 35 kV bus

由图 9 可知,发生铁磁谐振时零序磁通峰值达 80 Wb,1.02 s 左右投入二次消谐回路时,零序磁通大小约为 8 Wb。二次消谐回路投入时间约 0.4 s,消谐回路退出后零序磁通值不超过 15 Wb,并且逐渐衰减,而零序电压基本保持为 0,大约 10 s 后零序磁通基本减小到 0,铁磁谐振成功消除。

实际运行过程中受到零序电压波形不规律、采样偏差等方面影响,不一定能够准确找到零序磁通的过零点,但只要二次消谐回路投入时零序磁通较小,就仍能够使电压互感器脱离饱和区,从而消除铁磁谐振。

## 5 结论

文中分析了配电网 PT 铁磁谐振过程中的零序电压和零序磁通变化特征,提出了一种二次消谐的新方法,并通过仿真平台及实际系统进行验证,主要结论如下:

(1) 二次消谐回路在零序磁通过零点时投入,此时消谐速度最快,且比较彻底;

(2) 二次消谐回路在零序磁通接近过零点时投入,仍能成功消谐,但消谐速度较慢;

(3) 二次消谐回路在零序磁通最大时投入,很难彻底消除谐振,回路退出时容易重新激发谐振;

(4) 在零序磁通过零点投入二次消谐回路时,消谐回路的电阻值越小,消谐速度越快。

### 参考文献:

- [1] 郭凤仪,郑龙飞,张建飞. 电磁式电压互感器铁磁谐振特征[J]. 辽宁工程技术大学学报,2015,34(6):750-753.  
GUO Fengyi, ZHENG Longfei, ZHANG Jianfei. Characteristics of electromagnetic voltage transformer ferroresonance[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2015,34(6): 750-753.
- [2] 王文洁,王泱,古海滨. 电磁式电压互感器引发的铁磁谐振的研究[J]. 华北电力大学学报,2006,33(6):43-46.  
WANG Wenjie, WANG Yang, GU Haibin. Electromagnetic PT excited ferroresonance [J]. Journal of North China Electric Power University, 2006,33(6):43-46.
- [3] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.  
XIE Guangrun. Overvoltage of power system [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [4] 梁志瑞,赵梦雅,牛胜锁,等. 配电网电压互感器熔断器熔断防治措施的缺陷及新措施研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):17-24,32.  
LIANG Zhirui, ZHAO Mengya, NIU Shengsuo, et al. Defects of measures against PT fuse melting in distribution network and research of new measure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(9):17-24,32.
- [5] 周浩,余宇红,张利庭,等. 10 kV 配电网铁磁谐振消谐措施的仿真比较研究[J]. 电网技术,2005,29(22):24-34.  
ZHOU Hao, YU Yuhong, ZHANG Liting, et al. Comparative study of ferromagnetic resonance and harmonic elimination measures in the 10 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2005,29(22): 24-34.
- [6] 杨秉义,张立涛,董博. 基于 ARM+DSP 结构的 PT 铁磁谐振智能消谐装置设计[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13):149-154.  
YANG Bingyi, ZHANG Litao, DONG Bo. Design of intelligent suppression device for PT ferroresonance based on ARM+DSP [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 149-154.
- [7] 申文伟,何峰,鲍新,等. 中性点非有效接地系统电压互感器故障分析与治理措施研究[J]. 高压电器,2018,54(7):200-205.  
SHEN Wenwei, HE Feng, BAO Xin, et al. Study of potential transformer fault and mitigation measures in power system with non-direct grounding neutral point[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(7):200-205.
- [8] JIN W, SHI K, LI J H. The Study of ferromagnetic resonance overvoltage and its suppression methods in 35 kV power system [J]. Advanced Materials Research,2013(748):449-452.
- [9] 何立柱,吴经锋,张璐,等. 基于 EMTP-ATP 的变电站铁磁谐振计算与消谐措施研究[J]. 高压电器,2018,54(5):210-216.  
HE Lizhu, WU Jingfeng, ZHANG Lu, et al. Research on ferromagnetic resonance calculation and harmonic elimination measures in substation based on EMTP-ATP[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(5):210-216.
- [10] 何智强,李欣,范敏,等. 基于消谐器抑制铁磁谐振过电压研究分析[J]. 电瓷避雷器,2017(5):77-84.  
HE Zhiqiang, LI Xin, FAN Min, et al. Research on suppression of ferromagnetic resonance overvoltage based on harmonic elimination [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 77-84.
- [11] 周丽霞,尹忠东,郑立. 配网 PT 铁磁谐振机理与抑制的试验研究[J]. 电工技术学报,2007,22(5):153-158.  
ZHOU Lixia, YIN Zhongdong, ZHENG Li. Research on principle of PT resonance in distribution power system and its suppression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007,22(5):153-158.
- [12] 丁亚伟,刘岩,刘方,等. 二次消谐装置对抑制铁磁谐振有效性的仿真研究[J]. 能源工程,2011(4):15-19.  
DING Yawei, LIU Yan, LIU Fang, et al. Simulation study of the effectiveness of secondary harmonic devices in suppressing ferromagnetic resonance[J]. Energy Engineering, 2011(4): 15-19.
- [13] 皮霞,关宇航,袁铁江. 多功能消谐装置治理铁磁谐振过电压的局限性研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(1):93-99.  
PI Xia, GUAN Yuhang, YUAN Tiejiang. Study on the limitation of multiple function harmonic elimination device in the control of ferromagnetic resonance overvoltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2017,38(1):93-99.
- [14] 冯平. 一种混沌分析与抑制方法及在电力系统铁磁谐振中的应用研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2010.  
FENG Ping. Research on a method for chaos analysis and repression and its application to ferroresonance of power system [D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2010.
- [15] 冯平,王尔智. 中性点接地电力系统三相铁磁谐振的理论分析[J]. 电工技术学报,2004,19(9):57-61.  
FENG Ping, WANG Erzhi. Theoretical analysis on the eliminating of ferro-resonance in neutral-grounded power system by zero-sequence resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(9):57-61.
- [16] 邓聘. 硅钢材料的磁化特性及其磁路分析的研究[D]. 北

- 京:华北电力大学,2012.  
DENG Pin. Study on the magnetization characteristics of silicon steel materials and their magnetic circuit analysis[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2012.
- [17] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2005.  
LING Zishu. High pressure transformer technical manual[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2005.
- [18] 董维. 中压配电网铁磁谐振及抑制措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.  
DONG Wei. Research on ferroresonance and suppression mea-

asures in medium voltage distribution network [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

作者简介:



王洪林

王洪林(1987),男,硕士,工程师,从事电厂继电保护装置方面的研发工作(E-mail: wanghonglin@nrec.com);

王凯(1982),男,硕士,高级工程师,从事电厂继电保护装置方面的研发工作;

张琦雪(1974),男,博士,研究员级高级工程师,从事电厂继电保护装置研发工作。

## Secondary resonance elimination of distribution network based on flux variation

WANG Honglin, WANG Kai, ZHANG Qixue, CHEN Jun, WANG Guang

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

**Abstract:** The secondary resonance elimination devices are widely adopted in distribution network, but some field application effects are not satisfactory, and there are some cases of resonance elimination failure. In this paper, based on the analysis of voltage and flux variation characteristics of PT resonance in distribution network, a new control method of resonance elimination is proposed, which is to launch a device when zero sequence flux passes through zero point. This method avoids the influence of PT non-linear characteristics on the secondary resonance elimination process, consumes the resonant energy rapidly, and makes the network return to normal quickly. For the problem that the zero sequence flux cannot be measured in actual system, a zero-crossing detection method based on zero sequence voltage is proposed. The simulation results show that compared with the conventional resonance elimination method, the proposed method can effectively improve the success rate of the secondary resonance elimination, greatly reduce the working time of the secondary resonance elimination devices, and reduce the influence on the distribution network.

**Keywords:** distribution network; ferromagnetic resonance; secondary resonance elimination; flux variation; zero-crossing

(编辑 陈静)