TV铁磁谐振影响因素仿真分析及综合消谐策略研究

李梦娇[1]，黄亚峰[1]，周　银[2]，王汝田[1]

（1. 东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012；2. 国网荆州供电公司，湖北 荆州 434000）

摘要：在中性点不接地的配电网中，极易产生 TV 铁磁谐振过电压，严重威胁系统安全运行。铁磁谐振影响因素多种多样，常见消谐措施虽简单易行，但会因实际场景的改变导致消谐效果不理想。基于此，利用 PSCAD 对 TV 铁磁谐振与常见消谐方法进行模型搭建及仿真计算，分析总结消谐过程中的谐振影响因素及常见消谐方法的适用场景，得出的一系列结论对电力部门治理铁磁谐振具有一定的指导意义。同时提出分阶段实施的综合消谐策略，不仅降低了成本，而且将消谐措施复合，提出改进后的 4TV 接线法，根据不同场景及谐振类型选择各自适合的消谐方法，经仿真验证该消谐方案的有效性，其消谐效果优于仅使用单一传统消谐措施，可实现迅速消谐。

关键词：TV 铁磁谐振；谐振影响因素；分阶段消谐策略；改进后 4TV 法；PSCAD/EMTDC

Simulation analysis of influence factors of TV ferromagnetic resonance and research on comprehensive harmonic elimination strategy

LI Mengjiao[1], HUANG Yafeng[1], ZHOU Yin[2], WANG Rutian[1]

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Jingzhou Power Supply Company, Jingzhou 434000,China)

Abstract: In the distribution network with ungrounded neutral point, TV ferroresonance overvoltage is very easy to occur, which seriously threatens the safe operation of the system. There are various factors affecting ferroresonance. Although the common harmonic elimination measures are simple and easy to implement, the effect of harmonic elimination is not ideal due to the change of the actual scene. Based on this, this paper analyzes and summarizes the influence factors in the process of harmonic elimination and application scenarios of common harmonic elimination methods through the model building and simulation calculation of TV ferroresonance and common harmonic elimination methods by PSCAD, and draws a series of conclusions that can provide reference for the power sector to control ferroresonance. At the same time, a comprehensive harmonic elimination strategy implemented in stages is proposed, which not only reduces the cost, but also combines the harmonic elimination measures, and proposes the improved 4TV method to achieve the selection of appropriate harmonic elimination methods according to different scenarios and resonance types. The effectiveness of this harmonic elimination scheme is verified by simulation, and its harmonic elimination effect is better than that of using only a single traditional harmonic elimination measure, which can achieve rapid harmonic elimination.

Key words: TV ferromagnetic resonance; resonance influencing factors; phased harmonic elimination strategy; the improved 4TV method; PSCAD/EMTDC

国家自然科学基金资助项目（52277170）

0 引言

在中压配电网中，常采用电压互感器TV监测对地电压，当其与系统中的电容元件参数匹配时，在外界激励下极易产生铁磁谐振过电压，不仅会烧毁电气设备，还会导致绝缘击穿、继电保护装置误动作，以及母线全停、电动机逆转等现象的发生，严重危害电力系统安全运行[1]。近年来已有大量文献从其产生原理、识别方法及抑制措施等方面进行研究，如根据Peterson谐振分布原理提出谐振参数范围，近年来人们主要从谐振数学模型出发分析铁磁谐振产生机理。文献[2]利用*L*-*C*并联谐振等效电路分析不同类型铁磁谐振原理及运行范围；文献[3]对TV饱和过电流进行了仿真计算；文献[4]基于TV磁化特性深入研究铁磁谐振机理。以上方法有效改善了传统图解法与相平面法等在适用范围上的局限性。针对消谐方法的研究，常见的消谐方法虽取得一定消谐效果，但会因实际场景改变与自身局限性使消谐效果变差，如文献[5]从理论上对传统消谐措施做出详细介绍，但对其各自适用场景及优缺点仿真计算介绍不够详细；文献[6]中提出在TV三角短接处接入小电阻，虽降低了短路电流，但会出现各相电流激增振荡；文献[7]仿真分析了消弧线圈消谐的影响因素，虽可快速消谐，但成本较高；文献[8]从磁通分析入手，提出基于磁通变化规律的改进二次消谐法；文献[9]将柔性控制方法应用于铁磁谐振，但因编程难度大，工程上较少使用。对于铁磁谐振的准确识别，国内外学者做了大量研究，如文献[10]中提出根据基频谐振电流特征的检测方法，虽简单易行，但对电流的识别误差易造成谐振误判；文献[11]提出将小波分析与快速傅里叶变换（FFT）相结合的识别方法，虽理论上可靠，但因算法复杂影响判定时间，实际应用较少。

基于此，本文首先对TV铁磁谐振与常见消谐方法进行模型搭建及仿真计算，分析总结消谐过程中的谐振影响因素及常见消谐方法的适用场景，得出一系列结论，为电力部门治理铁磁谐振提供参考。同时提出分阶段实施的综合消谐策略，不仅降低成本，而且将消谐措施复合，提出改进后的4TV法，利用4TV法中的零序电感值对铁磁谐振准确识别，根据不同场景及谐振类型选择各自适合的消谐方法，经仿真验证该消谐方案的有效性，实现迅速消谐。

1 TV铁磁谐振产生原理及数学模型

在中压配电网中，TV常接于发电厂或变电站母线上，在零序回路中，忽略无关因素，TV铁磁谐振等效回路如图1所示，系统中线路各相对地电容C_0和TV各相非线性励磁电感L_{A}、L_{B}、L_{C}并联，形成三相各自独立的振荡回路。

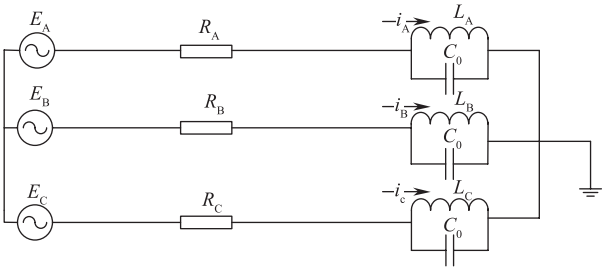


图1 *L*-*C*并联铁磁谐振等效电路

Fig. 1 *L*-*C* parallel ferromagnetic resonance equivalent circuit

图1中，E_{A}、E_{B}、E_{C}为系统电源电动势；i_{A}、i_{B}、i_{C}为TV电感瞬时值电流；u_{A}、u_{B}、u_{C}为TV电感瞬时值电压；e_{A}、e_{B}、e_{C}为电源电压瞬时值；e_0为中性点电压瞬时值；R_{A}、R_{B}、R_{C}为系统中各相线路电阻，可得

$$u_i+(i_i+C_0\frac{\mathrm{d}u_i}{\mathrm{d}t})R_i=e_i+e_0\ \ (i=\mathrm{A,B,C}) \tag{1}$$

$$u_i=\frac{\mathrm{d}\Phi_i}{\mathrm{d}t}\ \ (i=\mathrm{A,B,C}) \tag{2}$$

$$i_i=f(\Phi_i)\ \ (i=\mathrm{A,B,C}) \tag{3}$$

$$3e_0=u_{\mathrm{A}}+u_{\mathrm{B}}+u_{\mathrm{C}} \tag{4}$$

对以上微分方程组求解，将谐振前的初始值代入计算，得出各相电压电流、零序电压等瞬时值的变化状态，从而对铁磁谐振的特征进行分析。

若忽略各相线路电阻R，在图1中系统正常运行时可认为三相基本平衡，TV励磁电感在线

性范围内波动，中性点电压E_0为

$$E_0=\frac{\frac{E_A}{j\omega L_A}+\frac{E_B}{j\omega L_B}+\frac{E_C}{j\omega L_C}}{j3\omega C_0-(\frac{1}{j\omega L_A}+\frac{1}{j\omega L_B}+\frac{1}{j\omega L_C})} \tag{5}$$

式中，ω为交流系统角频率。

因三相对称，所以E_0=0。且铁磁谐振过电压大多数需要外部激发条件，如空母线合闸、单相接地短路消失瞬间等，故障消失瞬间，产生的过电流使TV进入饱和区，非线性励磁电感值迅速下降，三相电路不再对称，E_0升高，产生铁磁谐振过电压。对于TV励磁电感值L_{TV}，忽略铁心绕组电阻，定量计算式为

$$L_{TV}=\frac{U_L}{\frac{di}{dt}}=L_l+L=L_l+\frac{N^2A}{l} \tag{6}$$

式中，U_L为铁心电压；i为铁心绕组的瞬时值电流；L_l为漏感；N为匝数；A为导线横截面积；l为平均磁路长度。

当发生分频、高频谐振时，采用有效值合成法，计算公式为

$$E'_{A,B,C}=\sqrt{E_{A,B,C}^2+E_0^2} \tag{7}$$

可知各相均产生谐振过电压，由X_C=X_L，即系统对地容抗等于TV励磁电感感抗，可得

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \tag{8}$$

L与C_0共同决定铁磁谐振频率。X_C/X_L=0.01～0.07时可发生分频谐振；X_C/X_L=0.07～0.55时可发生基频谐振；X_C/X_L=0.55～2.80时可发生高频谐振，即为Peterson谐振分布原理。

2　配电网TV铁磁谐振的仿真

2.1　仿真模型的建立

在PSCAD中搭建典型10 kV配电网中的TV铁磁谐振仿真模型，如图2所示。

仿真系统参数详见表1。

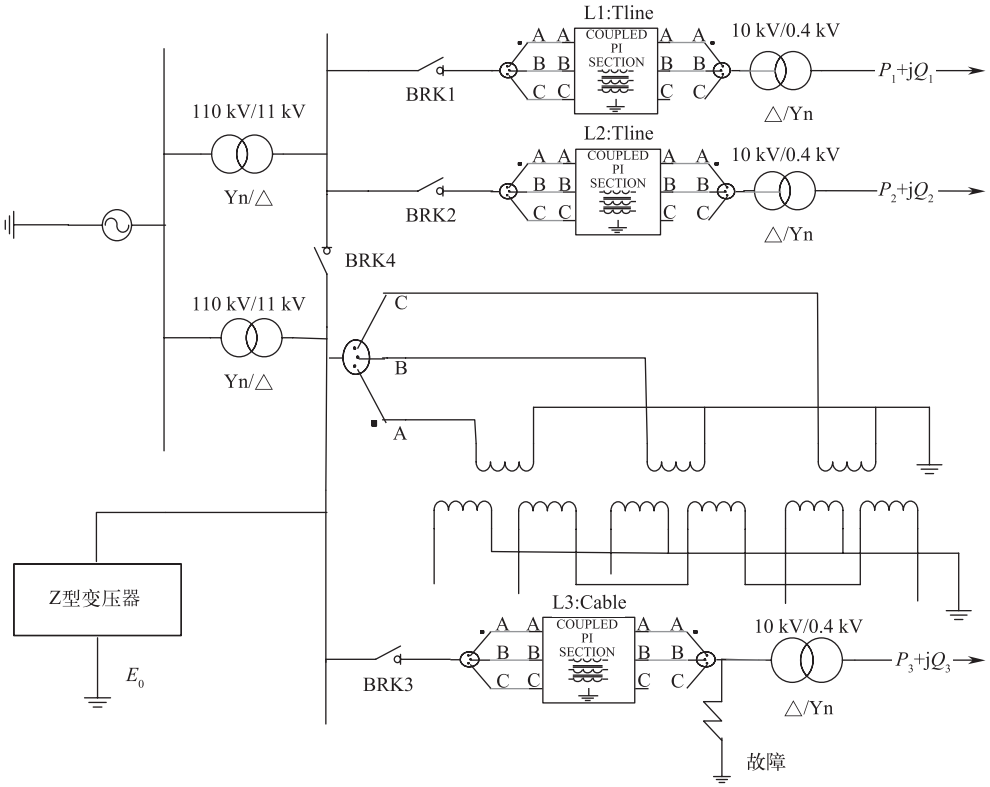


图 2　铁磁谐振仿真模型

Fig. 2 Ferromagnetic resonance simulation model

表 1 仿真系统参数

Tab. 1 TV volt-ampere characteristic

参数	设计值	参数	设计值
系统电源 / kV	110	母线	10 kV 分段母线
变压器 T	升压 T：110 kV/11 kV，“Yn/ △” 降压 T：10 kV/0.4 kV，“△ /Yn”	单相接地短路故障	产生 t=0.1 s 消失 t=0.2 s
架空线路	$C_{地L1}$=9.5 nF/km $C_{地L2}$=5 nF/km	空母线非同期合闸	t_A=0.2 s t_B=0.205 s t_C=0.2 s
电缆	$C_{地L3}$=600 nF/km	电压互感器 TV	“10 kV/ √ 3：100 V/ √ 3：100 V/3”； S_{max}=300 V·A； “Yn/Yn/ △”

利用3个单相UMEC变压器搭建TV模型，并输入u-i数据体现TV非线性励磁电感特性，伏安特性见表2，TV相电流最大有效值$I_{TV.max}$为

$$I_{TV.max}=S_{max}/U_{N相}=300\ \text{V·A}/5.77\ \text{kV}=52\ \text{mA} \tag{9}$$

本模型中设定TV铁耗很小，即忽略铁耗对铁磁谐振的衰减作用。

表 2 TV 伏安特性

Tab. 2 TV volt-ampere characteristic

U/kV	I/mA	U/kV	I/mA
6	3.8	12.4	31.5
8	5.7	12.8	49.3
10	8.9	13	59
12	21.3	14	114

由Peterson谐振分布原理知，X_L为TV在线电压下的励磁电抗，可得

$$X_L=10\ \text{kV}/8.9\ \text{mA}\approx1.12\ \text{MΩ} \tag{10}$$

因此，当5.2 nF≤C_0≤40.5 nF时，系统可发生基频谐振；当40.5 nF≤C_0≤283 nF时，系统可发生分频谐振，线路继续增长易发生低频振荡。

2.2 不同激发方式下的铁磁谐振仿真计算

对空母线合闸时，激发铁磁谐振在图2模型中进行仿真，同时以单相接地消失瞬间为例，调节线路长度使C_0分别至不同类型谐振范围内进行仿真计算。两种激发方式下的TV铁磁谐振过电压仿真如图3、图4所示。单相接地短路消失瞬间，不同类型铁磁谐振仿真数据见表3，设TV开口三角电压有效值为E_{arem}。

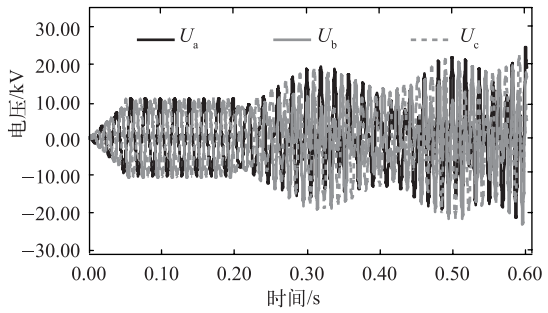


图 3 空母线非同期合闸 TV 铁磁谐振过电压

Fig. 3 TV ferromagnetic resonance overvoltage during non-synchronous closing of air bus

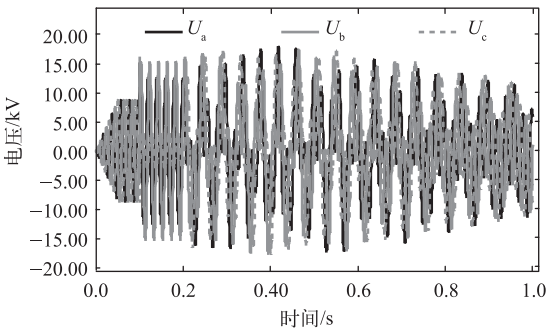


图 4 单相接地短路消失瞬间 TV 铁磁谐振过电压（C_0=250 nF）

Fig. 4 TV ferromagnetic resonance overvoltage at the moment of disappearance of single-phase grounding short circuit（C_0=250 nF）

表 3 不同类型铁磁谐振瞬时值

Tab. 3 Instantaneous value data of different types of ferromagnetic resonance

对地电容 C_0/nF	TV 电流峰值 /mA	TV 电压峰值 /kV	谐振消失时刻（即 E_{arem}<10 V）/s	谐振频率 f/Hz
25	461	18.1	0.4	50
50	622	17.8	0.7	25
250	2 690	19.0	1.0	20
500	3 000	15.3	1.0	10

可见，母线带短线路合闸时易激发高频谐振，产生的过电压倍数明显高于基频谐振与分频谐振。由表3知，单相接地消失瞬间，铁磁谐振的类型由X_C/X_L决定，符合Peterson谐振分布原

理。随着线路增加，C_0增大，易产生分频谐振，过电压较C_0=25 nF时的基频谐振过电压增加并不明显，但谐振过电流大大增加，如C_0=50 nF、C_0=250 nF和C_0=500 nF时，谐振频率不断降低，分频谐振过电流可分别达0.6 A、2.6 A和3 A，低频振荡时甚至可达十至百倍的额定电流，从而烧毁TV。

3　常见消谐方法适用场景及影响因素的仿真分析

常见消谐方法基于两种原理，改变系统参数消谐与增大系统阻尼消耗谐振能量。基于此，通过对工程中常用消谐措施进行建模与仿真计算，分析其优缺点、适用场景及影响因素，得出一系列结论，可为电力部门治理铁磁谐振提供参考。

3.1　改变系统参数消谐

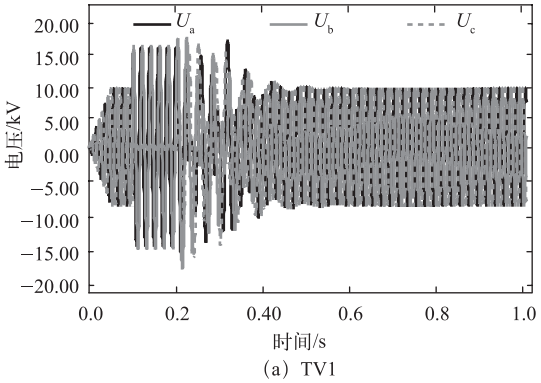
3.1.1 采用励磁特性较好的 TV

以单相接地短路消失瞬间为例，对两个不同励磁特性的TV进行仿真计算，TV1伏安特性见表2，TV2 伏安特性见表4。当C_0=30 nF时，TV电压波形如图5所示。

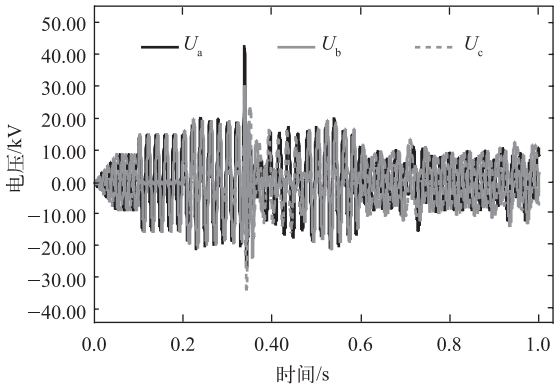
表 4　TV2 伏安特性

Tab. 4 TV2 volt-ampere characteristic

U/kV	I/mA	U/kV	I/mA
6	4.1	12.4	49.5
8	6.8	12.8	77
10	11	13	93
12	32.4	14	182



（a）TV1



（b）TV2

图 5　不同励磁特性 TV 的铁磁谐振过电压（C_0=30 nF）

Fig. 5 Ferroresonance overvoltage of TV with different excitation characteristics（C_0=30 nF）

对比表2与表4伏安数据可知，TV1与TV2的差异即为TV励磁阻抗大小关系的差异。根据Peterson谐振分布原理可知，不同的TV励磁电抗与系统对地电容并联，X_C/X_L比值不同，谐振频率也不同。图5中，相同的C_0下，励磁特性差，易发生饱和的TV2更易激发铁磁谐振，产生的过电压、过电流及谐振持续时间，较励磁特性好的TV1大大增加，如C_0=30 nF，在本模型中TV2的电流瞬时值可达TV1的6倍以上。不同励磁特性TV铁磁谐振数据见表5。

表 5　不同励磁特性 TV 铁磁谐振数据（C_0=30 nF）

Tab. 5 Ferroresonance data of TV with different excitation characteristics（C_0=30 nF）

TV	TV 电压峰值 /kV	TV 电流峰值 /mA	谐振消失时刻 /s
TV1	18.1	461	0.4
TV2	43.4	2 902	1.0

3.1.2 增大系统对地电容

系统杂散电容由系统结构确定，如电缆和线路的长度是按照设计要求固定的，一般不会改变，因此工程中常通过加装母线电容器组增大C_0。由上文仿真可知，单相接地短路消失后，调节C_0会激发不同类型的铁磁谐振，增大C_0对谐振抑制效果、特别是对过电流抑制效果差；对比图6可见，增大C_0对空母线合闸激发的高频谐振抑制效果明显。综上，增大C_0消谐，虽成本较低，但具有一定局限性。

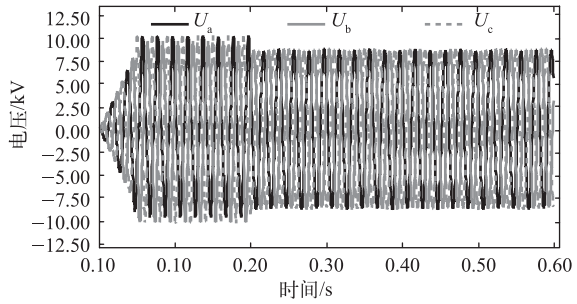


图 6　母线带长线路非同期合闸铁磁谐振过电压

Fig. 6 Ferromagnetic resonance overvoltage during non-synchronous closing of bus with long line

适当减少并联TV的台数，相当于使X_C/X_L比值减小至超出谐振范围，对谐振过电压抑制效果较好；随着系统规模增大，TV台数增多，X_C/X_L比值增大，所需母线电容器组容量更大，成本增加。

3.1.3 4TV 法

4TV法传统接线方式为单相零序TV经TV中性点接地且TV开口三角侧直接短接接地，故障时零序电压大部分由单相零序TV承担，接线简单，易产生极大短路环流，设TV电感励磁特性为

$$i_{Li}=f(\Phi_i)=a\Phi_i+b\Phi_i^3 \tag{11}$$

式中，a、b为拟合系数；Φ_i为TV铁心绕组磁通；i_{Li}为TV励磁电感电流。

$$\Phi_i=\Phi_{\max}\sin\omega t \tag{12}$$

式中，$\Phi_{\max}$为磁通最大值。

联立两式，化简得

$$i_{Li}=(a\Phi_{\max}+\frac{3b\Phi_{\max}^3}{4})\sin\omega t-\frac{b\Phi_{\max}^3}{4}\sin 3\omega t \tag{13}$$

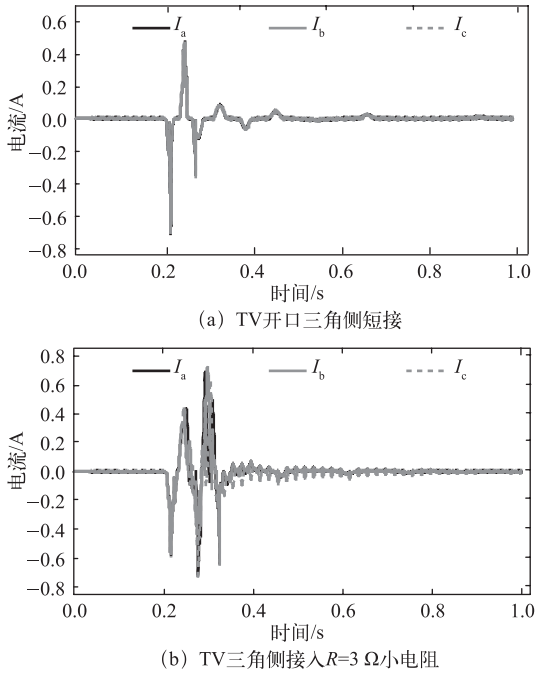
可知励磁电流中含3次谐波，因此易导致TV二次测量相电压波形畸变，采用开口三角短接且接地的4TV法，为电流3次谐波提供通道，大大减小TV电压波形失真。以单相接地短路消失瞬间为例，4TV法的消谐数据见表6，其零序TV与原TV励磁特性相同。

可见4TV法对基频谐振抑制效果好，但随着线路增加，发生分频谐振时，其消谐效果变差，4TV法短路电流也大大增加。工程中常采用在4TV三角短接处接入小电阻的方法抑制4TV法短路电流。图7为C_0=250 nF时，采用传统4TV法及在4TV三角短接处接入R=3 Ω小电阻后，两者分别对TV各相分频谐振过电流的抑制效果。

表 6　4TV 法消谐数据

Tab. 6 4TV harmonic elimination data

对地电容 C_0/nF	TV 电流峰值 /mA	TV 电压峰值 /kV	谐振消失时刻 /s	4TV 法短路电流最大有效值 /A
25	76	14.4	0.28	2.0
50	130	15.2	0.32	4.1
250	480	15.5	0.68	15.7
500	611	15.2	0.80	22.0



（a）TV开口三角侧短接

（b）TV三角侧接入R=3 Ω小电阻

图 7　加入 4TV 法后 TV 电流

Fig. 7 TV current after adding 4TV method

在三角短接处接入小电阻的4TV法，虽抑制了4TV短路电流，但消谐效果易变差，如图7b中的TV电流出现激增振荡过大现象。

3.2　消除谐振能量消谐

3.2.1 一次消谐

TV中性点经大电阻接地又称为一次消谐，即消谐电阻R与TV各相对地串联，设三相TV励磁电感相差不大，得R端电压U_R表达式为

$$U_R\approx(\frac{E_A+E_B+E_C+3E_0}{j\omega L_A})R=\frac{3E_0}{j\omega L_A}R \tag{14}$$

调节线路长度使C_0=500 nF，得单相接地短路消失瞬间，不同消谐电阻R下的消谐仿真数据

见表7。

表 7　一次消谐数据

Tab. 7 Primary harmonic elimination data

一次消谐电阻阻值 / kΩ	TV 电压峰值 / kV	TV 电流峰值 /mA	TV 一次侧线性电阻两端电压（U_R）/kV
30	12.6	296	9.15
40	13.1	238	9.85
50	13.5	199	10.38
60	13.8	170	10.7
70	13.9	148	11.0

由式（14）及表7知，大电阻通过抑制TV励磁涌流，降低TV铁心饱和程度消谐，且R值越大，过电流抑制效果越好；可分担中性点电压，但易导致零序电压误差，且谐振瞬间的过电压对电阻绝缘性要求高。

3.2.2 二次阻尼消谐

TV开口三角侧串接二次消谐电阻消耗谐振能量，因成本较低，所以工程上经常使用。在中压配电网中阻尼电阻常取2～30 Ω，不同C_0下单相接地短路消失瞬间的二次消谐数据见表8。

表 8　二次消谐数据

Tab. 8 Secondary harmonic elimination data

阻值 / Ω	TV 电压峰值 /kV		TV 电流峰值 /mA		TV 三角侧电流峰值 /A	
	C_0= 50 nF	C_0= 500 nF	C_0= 50 nF	C_0= 500 nF	C_0= 50 nF	C_0= 500 nF
30	9.8	11.9	220	918	12	10.0
20	11.1	11.5	289	788	15.9	13.8
10	13.4	10.24	424	486	23.7	21.9
5	14.7	10.9	554	538	31.3	30.2

由表8可见，随着线路增加，谐振频率降低，TV铁心饱和程度增大，为快速消耗增大的谐振能量与过电流，所需二次阻尼将不断变小；且其对过电流抑制效果较差。若超前铁磁谐振投入二次阻尼，会造成消谐回路长时间冲击电流的产生，滞后投入会造成消谐不彻底等，因此对投切时间准确性与阻值大小选择要求较高。

3.2.3 中性点经消弧线圈或小电阻接地

中性点经消弧线圈接地消谐相当于将很小的消弧电感L_{xh}与TV一次侧大电感并联分流，降低TV饱和程度，理论上L_{xh}值越小越好，但因其采用过补偿的方式，脱谐度应小于10%。所以

$$0<L_{xh}<\frac{1}{\sqrt{3}\omega^2 C_0} \tag{15}$$

图8为C_0=250 nF、L_{xh}=0.5 H时，对TV分频谐振过电压的抑制效果。

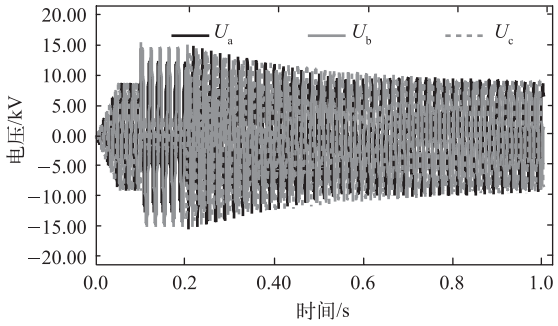


图 8　消弧线圈消谐后的 TV 电压（C_0=250 nF）

Fig. 8 TV voltage after arc suppression coil harmonic elimination（C_0=250 nF）

对比图8及图4可知，消弧线圈的消谐效果明显，全局性强，且消弧线圈的容量W表达式为

$$W=1.35I_C\frac{U_n}{\sqrt{3}} \tag{16}$$

随着城市电网的发展，电缆的增多，电容电流I_C大大增加，对W要求更高，成本增加。为降低成本，系统中性点经小电阻接地消谐，但其运行可靠性不高，设备维护成本增加。

4　综合消谐策略的研究及仿真验证

4.1　分阶段消谐方案的提出及改进后的4TV法

因系统多样性与复杂化，根据不同的系统结构及场景选取适当的消谐措施，对传统消谐方案进行复合优化，基于此提出分阶段实施的消谐方案。

1）在新建变电站的设计阶段，尽量减少TV接地点数量，将用户TV高压侧中性点改为不接地；应优先使用全绝缘型或励磁特性较好的TV，在变电站规划设计阶段消除谐振隐患。同时定期对电气设备进行试验，及时发现和更换不合格设备。

2）针对电网结构和实际场景采取相应消谐

措施。加装母线电容器组，抑制因合闸空母线激发的高频谐振；一次消谐抑制过电流；合理选择二次阻尼的大小及投切时间；4TV法对基频谐振抑制效果好等。根据消谐要求对常用消谐措施进行复合优化。

3）若前两步方案消谐失败，再加装成本较高的消弧线圈补偿系统，其消谐效果好，全局性强，但投资大，一般较少采用。

可将4TV法与一次消谐、二次消谐复合，即改进后的4TV接线法，如图9所示。

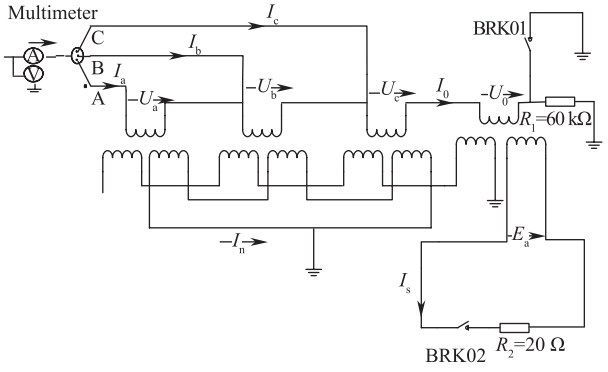


图 9　改进后 4TV 接线法的仿真模型

Fig. 9 The model of improved 4TV wiring method

初始状态采用传统4TV法，零序TV的励磁特性与原TV相同，该接线方式有效削弱了高次谐波分量的影响。当基频谐振发生时，4TV法消谐效果较好，4TV短路电流也较小，且迅速下降。但随着线路增加，产生分频谐振，仅使用4TV法消谐效果变差，因此检测到分频谐振时，将二次消谐装置投入与4TV法复合。在本文模型中，设L基准值为5 000 H，TV等效励磁电感L_d为$L_d(t)$的有效值，4TV法单相零序电感L_0为$L_0(t)$的有效值。当TV励磁电感处于线性状态，即正常运行与单相短路时，L_d的标幺值在线性范围内波动，即$L^*_{d线}$=(L^*_{setmin}，L^*_{setmax})=($L^*_{min}K_{rel}$，L^*_{max}/K_{rel})，引入K_{rel}=0.9解决系统中小干扰引发的电感值波动问题，在本文模型中经大量仿真计算得标幺值$L^*_{d线}$=（L^*_{setmin}，L^*_{setmax}）=（0.8，1.3）。

$$L_d(t)=\frac{U_a(t)+U_b(t)+U_c(t)}{\dfrac{di_0(t)}{dt}}=\frac{U_0(t)}{\dfrac{di_0(t)}{dt}}=L_0(t) \tag{17}$$

式中，U_0为零序电压；i_0为TV中性点零序电流；$L_d(t)$为TV等效励磁电感；$L_0(t)$为4TV法单相零序电感；U_a、U_b、U_c为TV三相相电压。

因采用开口三角短接的4TV法，U_0全部由单相零序电感承担，所以L_d可看作该4TV法中的单相零序电感L_0，对其进行测量求取简单方便，即L^*_d=L^*_0。当发生铁磁谐振时，TV开口三角侧产生零序电压，且TV零序非线性电感值因铁心饱和而急剧下降，因此可根据单相零序TV开口三角有效值E_{arem}>15 V且标幺值L^*_0<L^*_{setmin}判定铁磁谐振的产生。同时利用低通滤波器对E_0进行0～40 Hz滤波判别分频谐振，设

$$E_{0\sim40\ Hz,rem}=KU_N \tag{18}$$

式中，U_N为TV高压侧额定相电压。

通常3TV时K>0.6～0.65即可认为发生分频谐振，因采用4TV法，零序TV线性部分使E_0低频含量增大，所以在典型中压配电网中利用多个不同励磁特性的TV，在不同频率谐振区间下对K进行大量仿真，可设K_{set}=0.9～0.95。当K>K_{set}且E_{arem}>15 V，L^*_0<L^*_{setmin}时，投入二次阻尼20 Ω，与4TV法复合，实现分频谐振的快速消谐，根据单相零序TV三角侧电流I_s控制二次阻尼的断开，为确保消谐彻底，设E_a=1.0 V，即I_s<I_{sset} =1.0 V/20 Ω=50 mA时断开。同时取TV相电流$I_{TV相}$超出0.9$I_{TV.max}$或根据上文判据识别到分频谐振时，作为一次消谐电阻R_1=60 kΩ的投入条件，实现对分频谐振过电流I_{TV}与4TV短路电流I_n的有效抑制。本模型中$I_{TV.max}$为52 mA，$I_{n.max}$ = 300 V·A/ 33.3 V= 9 A。

4.2　改进后4TV法的模型搭建与仿真验证

在计算4TV法单相零序电感有效值L_0时，零序电压、电流可由PSCAD中的电压表U_0、电流表I_0直接实时测得，同时结合PSCAD微分计算模块、有效值计算模块，根据式（17）最终求得标幺值L^*_0；E_{arem}、I_s、I_n的测量同样在4TV开口三角侧采用电压表E_a、电流表I_s，在4TV三角短接处采用电流表I_n，结合有效值计算模块测得；K值的测量可根据式（18），利用PSCAD中低通滤波器对由Z型变压器引出的E_0进行0～40 Hz的滤

波，结合有效值计算模块、除法计算模块测得。BRK01与BRK02的开关状态可通过PSCAD中的定序器，由时间序列启动模块、变量设置模块和时间等待模块结合“与”或“非”门，根据4.1中所设的判据条件进行开关闭合阈值与断开阈值的设置，实现各个开关的准确控制。

下面在本模型中对改进后4TV接线法进行仿真计算，TV各相电流、电压可由PSCAD中的万用表模块直接测得，如图10～图12所示。复合消谐方法消谐数据见表9。

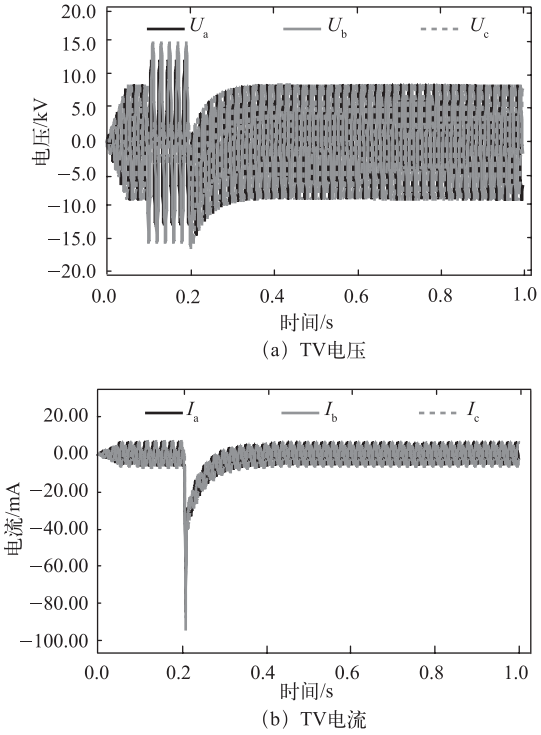


图 10　加入消谐方法后 TV 电压、电流瞬时值（C_0=250 nF）

Fig. 10 Instantaneous value of TV voltage and current after adding harmonic elimination method（C_0=250 nF）

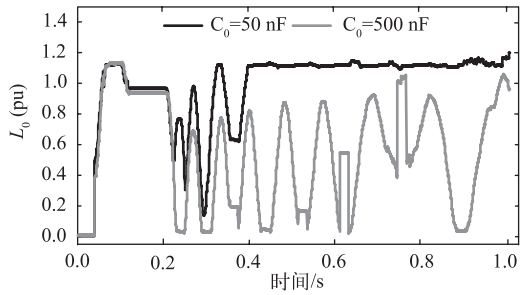


图 11　标幺值 L_0^*

Fig. 11 Unit value of L_0^*

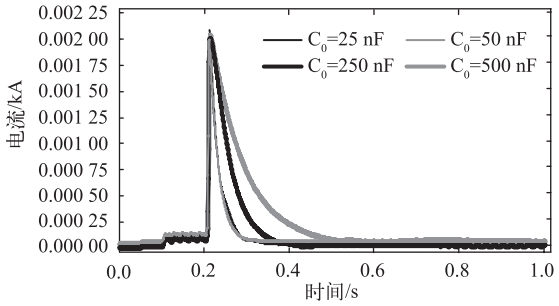


图 12　加入消谐方法后 4TV 法短路电流有效值

Fig. 12 Effective value of short-circuit current of 4TV method after adding harmonic elimination method

表 9　复合消谐方法消谐数据

Tab. 9 Harmonic elimination data of composite harmonic elimination method

对地电容 C_0/nF	TV 电流最大有效值 /mA		加入一次消谐电阻 R_1=60 kΩ 后 TV 中性点电压峰值 /kV		谐振消失时刻 /s	
	消谐前	消谐后	传统 3PT	改进后 4PT	消谐前	消谐后
25	227	38	9.0	8.8	0.4	0.28
50	302	37	10.4	8.7	0.7	0.28
250	753	38	11.2	9.6	1.0	0.30
500	812	37	10.7	9.5	1.0	0.33

由仿真计算可知：C_0=25 nF发生基频谐振时，4TV法可实现快速消谐，此时I_{TV}与4TV法短路电流有效值均小于其最大值$I_{TV.max}$与$I_{n.max}$并迅速降低；由图11可知，当铁磁谐振被激发后，L_0^*迅速降低，且低于线性状态值，可实现铁磁谐振的准确识别；在识别到分频谐振过电流后，将一次消谐、二次消谐电阻投入，分频谐振的I_{TV}有效值均被限制在$I_{TV.max}$内，大大改善了传统4TV法对于分频谐振过电流抑制效果较差的问题，消谐速度较传统4TV法也得到很大提升；图12中，不同C_0下的4TV法短路电流的最大有效值I_n均小于$I_{n.max}$并迅速下降，当C=25 nF、50 nF、250 nF和500 nF时，I_n分别为2.1 A、1.9 A、2.0 A和2.0 A，对比表6中传统4TV法的I_n及图10b、图7b可知，该新型4TV接线法不仅大大降低了4TV法的短路电流，如在C_0=500 nF时，I_n可降至传统4TV法I_n的9.1%，且有效改善了三角短路侧串联小电阻的传统抑制4TV短路电流方法引发的TV电流振荡激增。同时该消谐方案所采用的将一次消谐电

阻与4TV法复合，因4TV法使谐振过电流也得到一定程度减小，所以较3TV法而言，使TV中性点绝缘安全得到进一步提升。

5 结束语

本文首先分析铁磁谐振数学模型，建立铁磁谐振仿真模型；接着对不同激发方式下的铁磁谐振及常见消谐方法的适用场景与影响因素进行仿真计算；最后提出分阶段实施的综合消谐策略及改进的4TV法，经仿真验证该消谐方案的有效性，得出以下结论。

1）不同激发方式下产生不同特点的铁磁谐振。空母线合闸易激发高过电压倍数的高频谐振；单相接地短路消失瞬间易激发分频谐振，铁磁谐振的类型由X_C/X_L决定，符合Peterson谐振分布原理，线路增加，C_0增大，易产生分频谐振，过电流大大增加。

2）常见消谐方法的适用场景、影响因素存在差异。TV励磁特性的差异归根到底为TV励磁电抗值的差异，励磁特性差的TV激发的谐振过电压更为剧烈，同时应适当减少并联TV的台数；增大C_0消谐，虽成本较低，但局限性较高，其对空母线合闸激发高频谐振的抑制效果明显优于对单相接地消失瞬间激发的铁磁谐振；4TV法对基频谐振抑制效果好，对分频谐振抑制效果差，且短路电流大大增加；一次消谐电阻阻值越大，对谐振过电流抑制效果越好；二次消谐对投切时间准确性与阻值大小选择要求较高；消弧线圈全局性强，且L_{xh}越小消谐效果越好，但投资大，一般较少采用。

3）分阶段实施的综合消谐策略，不仅降低成本，而且将消谐措施复合，提出改进后的4TV法，利用4TV法的单相零序电感有效值L_0^*对铁磁谐振准确识别，随着线路不断增加，C_0不断增大，TV饱和程度逐渐加大，L^*_0值也越来越小，且在识别到分频谐振后将一次消谐、二次消谐和4TV法复合，实现迅速消谐及对4TV法短路电流与TV中性点绝缘安全的有效改善，最终根据不同场景及谐振类型选择各自适合的消谐方法。

参考文献

[1] 郝攀．配网铁磁谐振过电压及其抑制措施[D]．南京：东南大学，2018．

[2] 许贵民，姚帅，尹红霞．中性点非有效接地系统电磁式电压互感器铁磁谐振问题研究[J]．电气应用，2020，39(5)：53-60．

[3] 朱浩男，李云阁，郭劲东，等．配电网单相接地故障消失后PT饱和过电流分析[J]．变压器，2020，57(10)：35-40．

[4] 吉兴全，朱仰贺，李可军，等．基于Preisach理论的PT磁化特性分析及铁磁谐振检测方法[J]．安徽大学学报，2017，41(6)：86-93．

[5] 谭洪林，彭志炜，毛雅茹，等．配电网铁磁谐振及消谐策略研究[J]．电测与仪表，2019，56(14)：47-55．

[6] 姚玉海，朱勇，陈凡，等．10 kV 配网电压互感器断保险故障分析及应对措施[J]．电测与仪表，2020，57(2)：122-128．

[7] 郝耀华，曹斌，徐星琛，等．35 kV中性点经消弧线圈接地对铁磁谐振过电压影响的研究[J]．电瓷避雷器，2020 (2)：93-98．

[8] 王洪林，王凯，张琦雪，等．基于磁通分析的配电网PT二次消谐方法研究[J]．电力工程技术，2019，38(5)：170-176．

[9] 曾祥君，杨先贵，王文，等．基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]．中国电机工程学报，2015，35(7)：1666-1673．

[10] 张志磊，贾洪瑞，刘红文，等．基于零序电压和PT电流复合检测的铁磁谐振二次消谐仿真研究[J]．电瓷避雷器，2020(5)：183-189．

[11] 杜林，李欣，吴高林，等．采用3类特征参量比值法的铁磁谐振过电压识别[J]．高电压技术，2011，37(9)：2241-2249．

作者简介

李梦娇（1998—），女，通讯作者，硕士研究生，研究方向为中压配电网铁磁谐振过电压。

（收稿日期：2023-01-28）

TV铁磁谐振影响因素仿真分析及综合消谐策略研究　P1

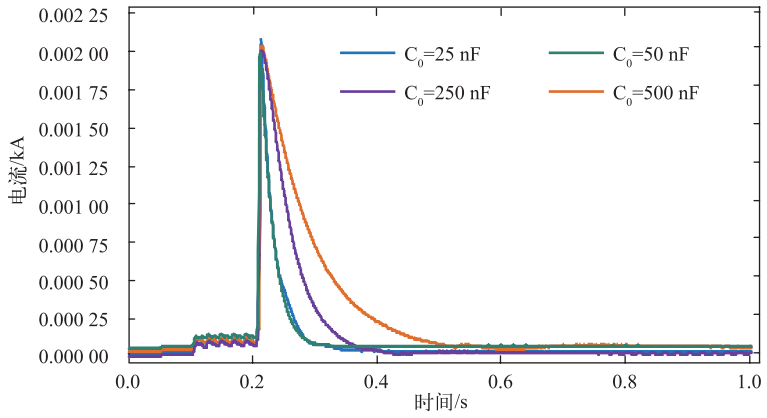


图 12　加入消谐方法后 4TV 法短路电流有效值

Fig. 12 Effective value of short-circuit current of 4TV method after adding harmonic elimination method

基于深度学习集成方法的日用电最大负荷预测　P70

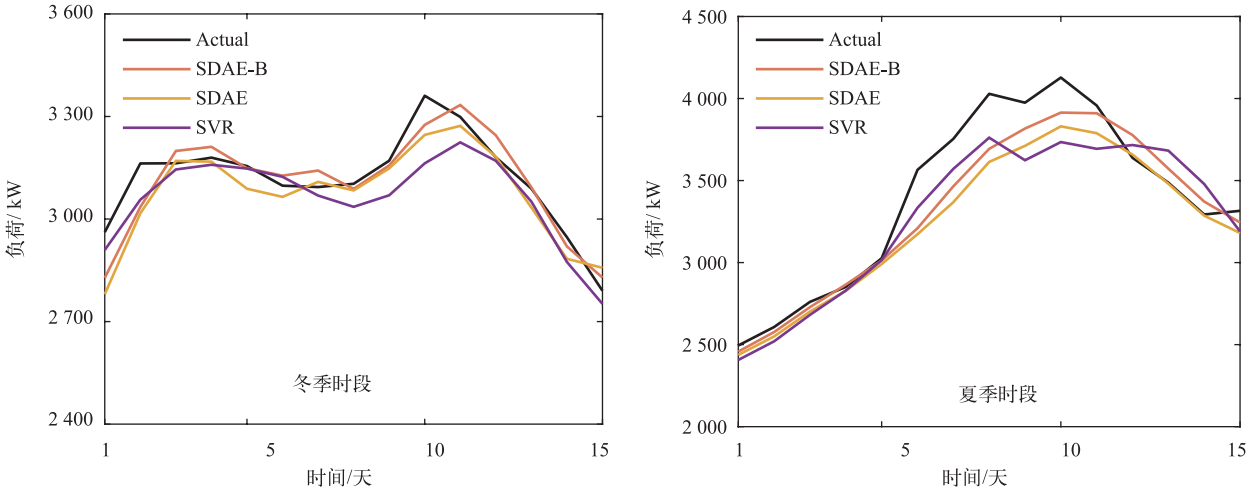


图 10　测试样本不同时段不同方法预测结果对比

Fig. 10 Comparison of prediction results of different methods in different periods of time for test samples