

# 基于磁环的海上风电场高频重燃过电压的抑制研究

方春恩, 王渊朝, 潘麟, 李伟, 牟霖  
(西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039)

**摘要:** 随着“低碳环保”的发展, 国家在节能减排和环境污染上愈发的重视, 作为清洁能源之一的风电, 成为国家政策大力支持的产业。为了准确模拟出海上风电场的高电压暂态特性及抑制措施, 对海上风电场重燃过电压进行了建模仿真, 在分析了海上风电场过电压的机理上, 基于 ATP-EMTP 进行了真空断路器、变压器、高频磁环的建模, 建立了海上风电系统并仿真了真空断路器的分闸重燃现象。提出了利用高频磁环对重燃过电压的抑制措施, 分析了不同磁环材质、不同磁环长度、不同磁环内外径、不同磁环形状大小对重燃过电压的抑制效果, 得出磁环对海上风电场重燃过电压抑制的可行性及有效性。

**关键词:** 高频磁环; 真空断路器; 重燃过电压; ATP-EMTP; 过电压抑制

## Study on The Suppression of High Frequency Reignition Overvoltage of Offshore Wind Farm Based on Magnetic Ring

FANG Chun'en, WANG Yuanchao, PAN Lin, LI Wei, MU Lin  
(School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** With the development of 'low carbon and environmental protection', the country has paid more and more attention to environmental pollution and energy conservation and emission reduction. As one of the clean energy sources, wind power has become an industry strongly supported by national policies. In order to accurately simulate the high-voltage transient characteristics and suppression measures of offshore wind farms, this paper modeled and simulated the re-ignition overvoltage of offshore wind farms. On the basis of analyzing the overvoltage mechanism of offshore wind farms, a vacuum circuit breaker was constructed based on ATP-EMTP. transformer, high-frequency magnetic ring modeling, the establishment of offshore wind power system and simulation of the vacuum circuit breaker re-ignition phenomenon. The suppression measures of high-frequency magnetic ring for re-ignition overvoltage are proposed, and the suppression effects of different magnetic ring material and lengths, different inner and outer diameters of magnetic rings, and different magnetic ring shapes and sizes on re-ignition over-voltage are analyzed. Feasibility and effectiveness of overvoltage suppression for offshore wind power.

**Key words:** high frequency magnetic ring; vacuum circuit breaker; re-ignition overvoltage; ATP-EMTP; overvoltage suppression

### 0 引言

风能作为主要的新能源之一, 受到国家的广泛关注, 近年来海上风电的发展更是成为了可再生能源发展的主要领域, 随着海上风电的大力发展, 其运行的可靠性和安全性也受到了极大的重视。

海上风电集电系统使用大量的电缆, 真空断路器由于优秀的性能被普遍使用在海上风电系统中, 由于风能的随机性和间接性, 使得真空断路器频繁的投切电气设备, 引起高幅值、高陡度的过电压, 特别在海上风电的运行中, 真空断路器开断感性负载时, 将产生包括截流过电压、重燃过电压等多种形式的过电压波<sup>[1-2]</sup>。再加上过电压波在海缆中的折反射, 产生陡度更高的过电压波, 高幅值、高陡度

的操作过电压是造成海上风机变压器绝缘破坏的主要原因之一<sup>[3-5]</sup>。

因此, 抑制海上风电场重燃过电压是维持其稳定运行的重要方式。目前抑制过电压可以通过使用避雷器、RC 阻容吸收器、高频磁环的方法来实现。避雷器对过电压的幅值具有有效的抑制, 但是对过电压陡度的抑制效果不明显; RC 阻容吸收器因其成本和体积等原因, 没有大规模用于海上风电场。文中首先利用 ATP-EMTP 仿真软件搭建海上风电场高频暂态模型, 然后根据实际海上风电场集电系统进行组合, 研究和分析磁环材质、磁环长度、磁环内外径、磁环体积对海上风电场过电压的抑制效果, 从而为实际海上风电场安全可靠的运行提供指

基金项目:国家自然科学基金(51477142)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477142).

导依据。

## 1 高频过电压产生原理

海上风电系统中高频过电压的产生主要是由真空断路器开断操作引起。当真空断路器切除风机变压器时，其实质是断开等效电感和电容，使其储存在其中的能量在断开的一瞬间释放出来，从而在电路中产生电磁振荡和引起过电压。

### 1.1 截流过电压

真空断路器接受分闸指令后动静触头开始分离，触头间隙很小，其两端会出现电弧使电流持续导通。由于真空断路器具有较强的灭弧能力，此时电弧电流不是通过工频电流的零点熄弧而是电流似乎从某一电流值几乎突然下降到零而熄灭，电流突然截断导致的电磁振荡会使负载回路电压发生第一次升高，此过电压即为截流过电压<sup>[3-5]</sup>。

设截断时的电流值为  $i = I_0 = I_m \sin \alpha$  ( $\alpha$  为截断电流的相位角)，此时的电压值  $U_0$  为

$$U_0 = \sin(\alpha + 90^\circ) \quad (1)$$

截流前一刻的电感和电容中的储能为：

$$W_L = \frac{1}{2} L_T I_0^2 \quad (2)$$

$$W_C = \frac{1}{2} C_T U_0^2 \quad (3)$$

截流瞬间，储存在电感中的能量  $W_L$  全部转变电磁能量  $W_C$  储存在电容，此时电容电压  $U_C$  表示为：

$$\frac{1}{2} C_T U_C^2 = \frac{1}{2} L_T I_0^2 + \frac{1}{2} C_T U_0^2 \quad (4)$$

$$U_C = \sqrt{\frac{L_T}{C_T} I_m^2 \sin^2 \alpha + U_m^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

由  $I_m = \frac{U_m}{2\pi f L_T}$ ，频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_T C_T}}$ ，因此有

$$U_C = U_m \sqrt{\left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (6)$$

其过电压倍数  $K$  为

$$K = \frac{U_C}{U_m} = \sqrt{\left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (7)$$

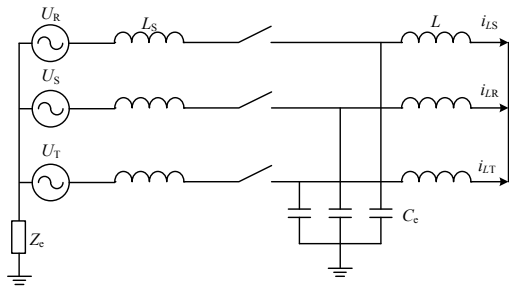
### 1.2 重燃过电压

当真空断路器开断空载变压器的小电感电流时，由于真空断路器有较强的分断能力，出现电流在未到达自然零点前被强行开断。从能量角度阐述，截流瞬间储存的电感电容的能量在回路中振荡，由于电容值一般很小，所以当所有的储能都转化为电场能的瞬间，就会出现很高的过电压，刚截流的初始阶段，触头开距很小，触头间的介电强度很有限，而恢复电压却由于高频振荡升高的很快，恢复场强等和介电强度相等时，发生第一次重燃。当第一次重燃产生的高电压，如果在非常短的时间内真空断路器的暂态恢复电压再一次超过介质绝缘强度时，则触头间的间隙会再次击穿，将会发生第二次重燃，在上一次重燃产生的高电压基础上发生下一次重燃，会使过电压不断叠加，造成远超过截断过电压幅值的过电压。

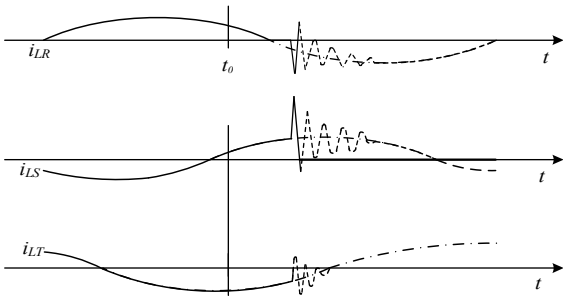
### 1.3 虚拟截流

虚拟截流是在一相发生第一次截流且正在进行重燃，而其余两相电流没有过零的情况下发生。如果负载回路三相间电容或对地电容较大，则首开相由于重燃出现的高频电流可以通过相间电容耦合到其余两相之中，和其余两相中的工频电流叠加。当首开相重燃严重且回路相间耦合比较严重时，耦合到其余两相的高频电流幅值就会超过工频电流幅值，当两个电流的相位相反时会迫使工频电流过零点，此时另两相的电流将会被强制截断并发生重燃<sup>[6-9]</sup>。至此，真空断路器三相全发生重燃现象，造成更加严重的过电压。感性负载的简化三相等效电路图见图1(a)，图1(a)中： $Z_c$ 为对地阻抗； $L$ 为感性负载；

$C_c$ 为对地电容。虚拟截流原理图见图1(b)，图1(b)中： $i_{LR}$ 、 $i_{LS}$ 、 $i_{LT}$ 为三相电流； $t_0$ 为触头断开时间。



(a) 感性负载的简化三相等效电路图



(b) 虚拟截流开断过程中的电流

图1 虚拟截流原理图

Fig. 1 Schematic diagram of virtual interception

## 2 磁环工作原理及特性

### 2.1 磁环抑制过电压原理

磁环作为抗干扰元件，其阻抗可表示为和频率有关的函数  $Z(f) = R(f) + j\omega L(f)$ 。对于高频信号有很好的抑制作用，在不同的频率下有不同的阻抗特性，一般在低频时阻抗很小，当频率升高磁环表现的阻抗急剧升高<sup>[10-12]</sup>，当风电场正常运行时，电路频率为 50 Hz，磁环的等效阻抗对电路的影响很小，当频率几 MHz 时，磁环表现出很大的阻抗，随着频率的升高，总阻抗增长较快，通过磁环的电磁干扰波将其吸收，并以热能的形式散发出去，增加传播路径中的能量损耗，减小过电压的陡度。

### 2.2 磁环特性

磁环材料的 B-H 曲线见图 2，为了选取合适的磁环，对磁环特性进行简单分析。

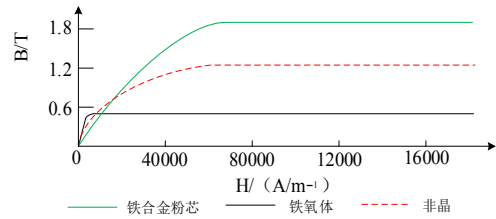


图2 磁环材料的 B-H 曲线图

Fig. 2 B-H curve diagram of magnetic ring material

当磁场强度很低时，其 B-H 曲线近似成线性关系，随着磁场强度的增大，磁通密度逐渐达到最大饱和值，当磁环饱和后，磁导率趋于 0，磁环的等效电感值减小，对过电压的抑制效果减小<sup>[13-17]</sup>。在高频特性下，磁环的损耗主要包括磁滞损耗、涡流损耗、其他损耗，磁滞损耗磁化曲线所包围的环面积成正比关系，文中将磁环等效为非线性的电感元件，即忽略了磁环的磁滞损耗，磁环的等效电感主要决定于磁导率和磁环的尺寸，高磁导率的磁性材料可以加强磁环的抑制效果<sup>[17-21]</sup>。因此磁环的选取应具有高饱和、高磁导率、高工作频率的特性。文中选取了铁氧体 R2KB、非晶 FJ37、铁合金粉芯 3P 为例仿真分析。

## 3 试验仿真模型

### 3.1 真空断路器模型

为了获得真空断路器开断海上风电场中变压器的电压特性，基于海上风电的拓扑结构(图 3)，在 110 kV 海上变电站的 35 kV 侧进行模拟，为了简化仿真，选择了一台风机投入运行，如图 3 虚线所示。

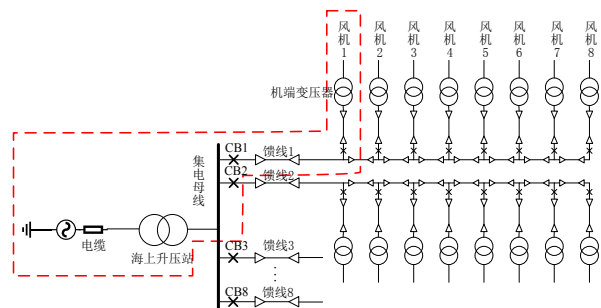
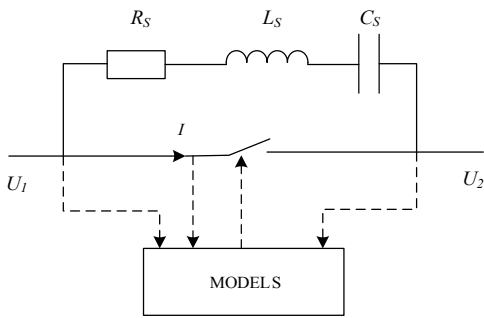


图3 海上风电场简化示意图

**Fig. 3 Simplified schematic diagram of offshore wind farm**

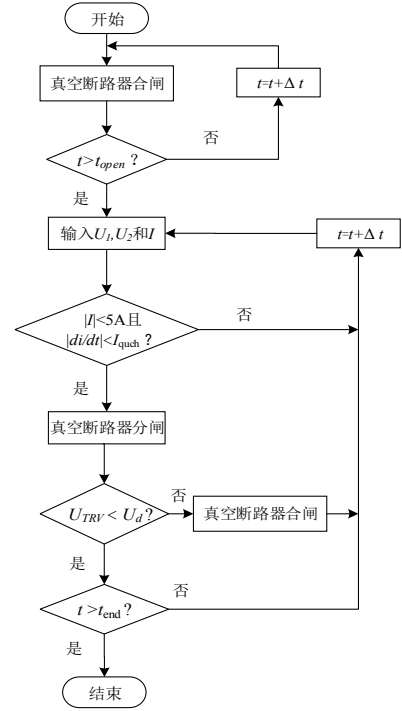
为了准确模拟出真空断路器的重燃、截流等特性，基于文[10-13]，建立了真空断路器模型见图4，真空断路器的特性的实现程序通过在 MODELS 中编程。流过真空断路器的电流和接触电压由探头采集，然后输入到程序中，MODELS 中的程序输出变量来控制开关的状态。具有  $C_S$ 、 $L_S$ 、 $R_S$  的支路与断路器并联，且  $C_S=0.02$  nF,  $L_S=0.05$   $\mu$ H,  $R_S=50$   $\Omega$  表示真空断路器的杂散电容、电感和电阻。



**图4 真空断路器模型**

**Fig. 4 Model of vacuum circuit breaker**

模型通过采集断路器两端的电压和流过断路器上的电流，通过程序的计算比较，输出控制信号来控制断路器的开断。当断路器的端电压大于其介质绝缘恢复电压强度时，断路器击穿产生电弧，当断路器在电流过零点时，其灭弧能力大于电流陡度时，断路器灭弧。其程序流程图见图5。



**图5 断路器分合闸流程图**

**Fig. 5 Flow chart of circuit breaker opening and closing**

图5中： $t$ 为实际时间； $t_{open}$ 和 $t_{close}$ 为断路器分合时间； $t_{end}$ 为仿真时长。当真空断路器分闸时，触头间介质绝缘强度随着距离的增大而增大。对于断路器的介质绝缘恢复强度可表示为<sup>[8]</sup>

$$U_d = A(t - t_{open}) + B \quad (8)$$

合闸时的介质绝缘恢复强度为

$$U_d = U_{TRV} - A(t - t_{close}) - B \quad (9)$$

式(9)中： $A$ 为击穿电压上升率； $B$ 为初始击穿电压； $U_{TRV}$ 为最大击穿耐受电压。其中 $A=1.3 \times 10^7$  V/s,  $B=690$  V, 见表1。

**表1 击穿电压强度常数**

**Table 1 Breakdown voltage strength constant**

电压类型	$A/(V \cdot s^{-1})$	$B/V$
高压	$1.70 \times 10^7$	$3.40 \times 10^3$
中压	$1.30 \times 10^7$	$0.69 \times 10^3$
低压	$0.47 \times 10^6$	$0.69 \times 10^3$

真空断路器的高频灭弧能力可表示为电流随时间的变化率<sup>[9-13]</sup>

$$I_{quch} = \overline{di/dt} = C(t - t_{open}) + D \quad (10)$$

式(10)中,  $C$ 、 $D$  分别为电流灭弧能力上升率和初始灭弧能力。其中  $C=0.32 \times 10^{12} \text{ A/s}^2$ ,  $D=155 \times 10^6 \text{ A/s}$ , 见表 2。

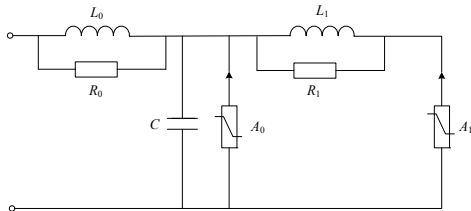
表 2 灭弧能力常数

Table 2 Arc extinguishing ability constant

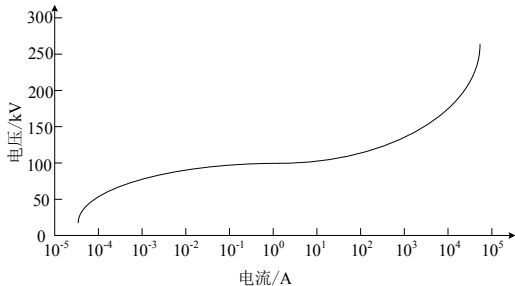
$di/dt$ 的类型	$C/(\text{A} \cdot \text{s}^{-2})$	$D/(\text{A} \cdot \text{s}^{-1})$
高压	$-3.40 \times 10^{11}$	$255.0 \times 10^6$
中压	$0.32 \times 10^{12}$	$155.0 \times 10^6$
低压	$1.00 \times 10^{12}$	$190.0 \times 10^6$

### 3.2 避雷器模型

避雷器可以抑制过电压的幅值, 避雷器一般安装在海上风机上, 当遇到高幅值的过电压时会根据交变电场电介质极化作用原理形成 3 种电流, 并将电流导通到地, 且非线性电阻会消耗一部分能量, 达到对过电压幅值的抑制。依据文[22]建立避雷器频率模型, 见图 6(a), 图 6(a)中  $L_0=0.1364 \mu\text{H}$ ,  $R_0=68.2 \Omega$ ,  $L_1=10.23 \mu\text{H}$ ,  $R_1=44.33 \Omega$ ,  $C=146.628 \text{ pF}$ ,  $A_0$ 、 $A_1$  由实验确定。避雷器的伏安特性曲线见图 6(b)。但避雷器只对过电压的幅值有较好的抑制效果, 对过电压的陡度抑制效果不佳。



(a) 氧化锌避雷器频率依赖模型



(b) 避雷器 V-I 特性曲线

图 6 氧化锌避雷器模型图

Fig. 6 Model drawing of zinc oxide arrester

### 3.3 高频变压器模型

由于真空断路器频繁的投切所产生的高频过电压会对风机变压器的绝缘造成破坏, 为了模拟变压器的高频过程, 需要建立一个应用于高频的变压器模型来提高其暂态仿真的准确性。变压器采用 BCTRAN 模型, 其特性需要考虑杂散电容, 高频变压器模型见图 7。

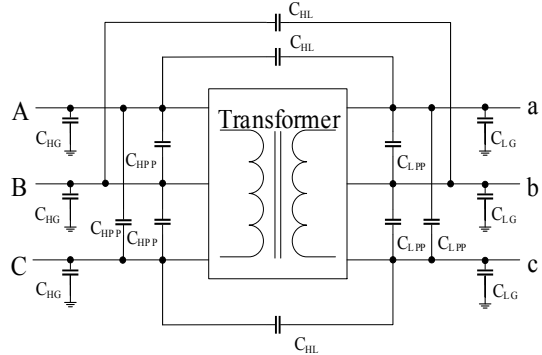


图 7 高频变压器模型

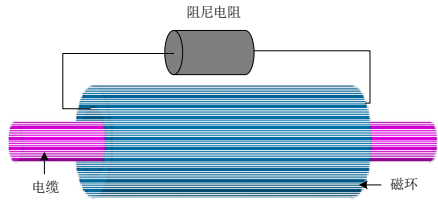
Fig. 7 High frequency transformer model

图 7 中:  $C_{HPP}$  为高绕组的电容;  $C_{LPP}$  为低绕组的电容;  $C_{HL}$  为高低绕组间的电容;  $C_{HG}$ 、 $C_{LG}$  为高、低绕组对地电容。文中取  $C_{HPP}=C_{LPP}=0.15 \text{ nF}$ ,  $C_{HL}=2.1 \text{ nF}$ ,  $C_{HG}=1 \text{ nF}$ ,  $C_{LG}=2.5 \text{ nF}$ 。

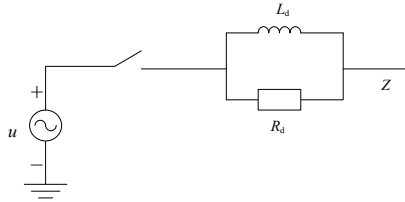
### 3.4 磁环模型

在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中, 可以利用非线性电感模拟磁环。文中通过计算磁环磁链的 B-H 特性和实际的几何尺寸, 可以得出磁环的磁链  $\psi$  和电流  $I$  的关系曲线, 导入  $\psi$ - $I$  曲线数据完成非线性电感建模<sup>[11]</sup>, 由于过电压的幅值和陡度很高, 磁环很容易饱和, 而且单独使用磁环仅可以降低过电压波的陡度, 不能消耗其能量, 因此将用磁环并联阻尼电阻来抑制过电压的幅值和陡度。

磁环参数对过电压的抑制非常重要, 且阻尼电阻的取值有最优值, 经过仿真分析, 阻尼电阻  $R_d$  选取  $100 \Omega$  为最优值。并联阻尼电阻可以消耗线路能量, 减小磁环的饱和程度。磁环和阻尼电阻并联模型及等效电路图见图 8。



(a) 磁环和阻尼电阻并联模型



(b) 磁环和阻尼电阻等效电路图

图 8 磁环和阻尼电阻模型图

Fig. 8 Magnetic ring and damping resistance equivalent circuit diagram

$$u_z = u \left[ 1 - R_d / (Z + R_d) \right] e^{(-t/L_d) \left[ Z R_d / (Z + R_d) \right]} \quad (11)$$

式(11)中:  $u$  是磁环前母线的电压行波;  $L_d$  为磁环的电感值;  $Z$  为磁环后母线线路的波阻抗;  $t$  为时间;  $u_z$  为线路母线首段的电压值。

#### 4 仿真分析

为研究磁环在海上风电场中对过电压的抑制效果,文中使用暂态仿真软件 ATP-EMTP 建立磁环模型,并基于海上风电场结构,分析磁环长度以及磁环形状对过电压的影响。文中以海上风电场单台风机投入运行为例,搭建仿真模型来进行仿真分析,风机端电压 690 V,通过升压变压器升到 35 kV,然后通过 80 m 电缆和真空断路器连接到 35 kV 电压等级的馈线上,然后经过升压变压器升压至 110 kV 经过 15 km 的电缆传输到陆上变电站。风机变压器容量为 4 MVA,额定电压为 35/0.69 kV。海底电缆为 35 kV 等级的交联聚乙烯电缆,横截面积为  $3 \times 400 \text{ mm}^2$ 。RC 阻容吸收器的等效模型为电阻和电容的串联,等效电阻为  $50 \Omega$ ,等效电容为 10 nF。集电系统见图 9。

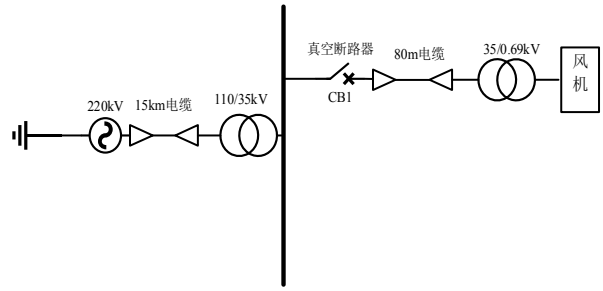
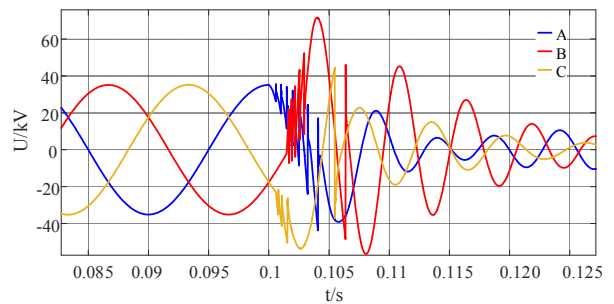


图 9 单台风机仿真图

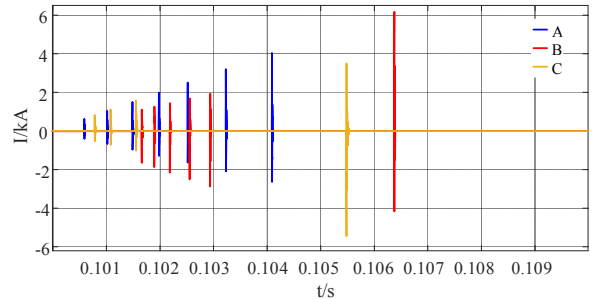
Fig. 9 Simulation circuit diagram of a single fan

#### 4.1 磁环对高频暂态过电压影响

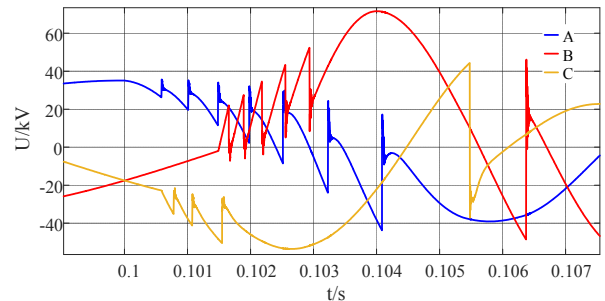
以集电系统模型建立仿真线路,进行一系列的模拟,在没有采取任何抑制过电压措施的情况下得到变压器高压侧电压和电流波形,见图 10。



(a) 电压波形



(b) 电流波形



(c) 重燃放大波形

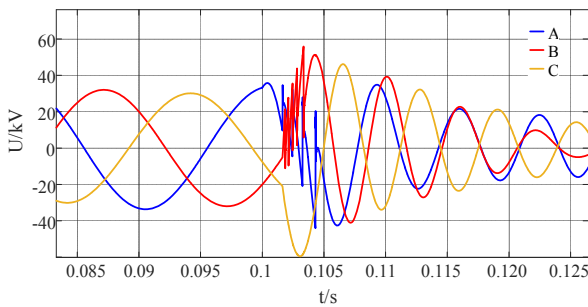
图 10 无抑制措施 35kV 侧过电压和电流波形

Fig. 10 No suppression measures 35kV side overvoltage and current waveform

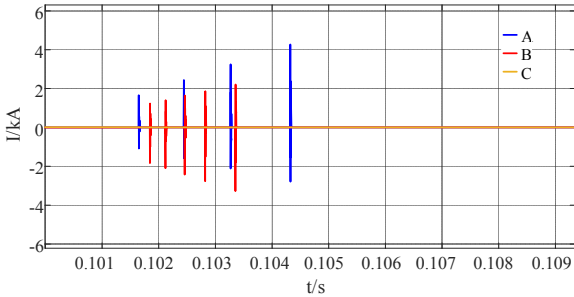
由图 10 可知三相电压在分闸过程中均产生多

次重燃，引起高幅值、高陡度的过电压，A相为首开相，由于电缆的耦合效应和产生虚拟截流效应，A相电压耦合到B、C两相，造成严重的过电压，最为严重的B相过电压最大峰值达到 71.60 kV。

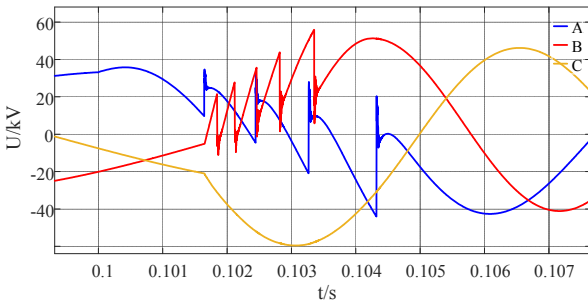
加磁环后三相过电压和电流波形见图 11，由图 11 可知磁环的加入对过电压和电流的抑制明显，重燃次数明显减少，过电压幅值降低为 59.02 kV，陡度明显降低。由图 10 可知，三相电压电流以 B 相过电压过电流最为严重，故以下分析以 B 相为例。



(a)电压波形



(b)电流波形



(c)重燃放大波形

图 11 加磁环后三相过电压和电流波形

Fig.11 Three - phase overvoltage and current waveform after adding magnetic ring

不同抑制措施的电压波形见图 12，由图 12 可以看出，在海上风电仿真试验中，磁环对过电压的抑制效果更好，衰减速度更快。不同抑制措施的仿

真参数见表 3，由表 3 可以看出：对比几种抑制措施，磁环的高频过电压抑制效果要好于传统的避雷器和 RC 阻容吸收器，对幅值和陡度的抑制较好，对电气设备的保护有重要作用。

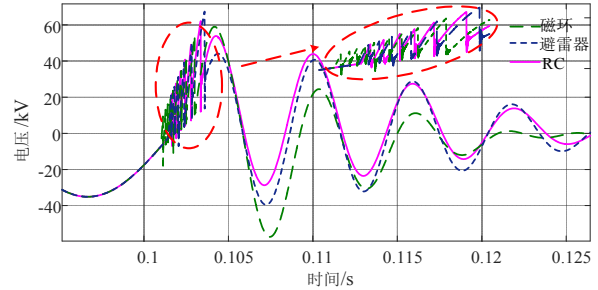


图 12 不同抑制措施的电压波形

Fig. 12 Voltage waveforms for different suppression measures

表 3 不同抑制措施的仿真参数

Table 3 Simulation parameters for different inhibition measures

抑制措施	最大峰值/kV	首峰时间/ $\mu$ s
未加磁环	71.60	3.0
加入磁环	59.30	4.3
避雷器	65.20	3.2
RC	63.41	3.7

#### 4.2 磁环材质对高频暂态过电压影响

由于过电压的幅值较大且其能量主要集中在高频段，所以要求磁环材料具有高磁饱和特性和高工作频率，为此选取铁氧体、非晶铁心和铁合金粉芯 3 种磁环材料做对比。不同材质磁环过电压抑制波形见图 13，不同材质磁环过电压仿真参数见表 4。

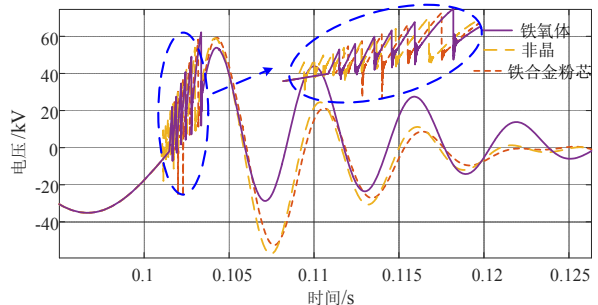


图 13 不同材质磁环过电压抑制波形

Fig. 13 Overvoltage suppression waveforms of magnetic rings with different materials

表 4 不同材质磁环过电压仿真参数

Table 4 Simulation parameters of magnetic ring overvoltage

with different materials

磁环材质	最大峰值/kV	首峰时间/ $\mu\text{s}$	峰值陡度 $/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
无磁环	71.60	3.0	23.87
铁氧体	62.70	4.0	15.68
非晶	59.67	4.1	14.55
铁合金粉芯	59.02	4.2	14.05

分析图 13 的仿真结果可知,铁合金粉芯磁环和非晶磁环对过电压的抑制效果明显。由表 4 可以看出 3 种磁环材质对陡度的衰减分别为 34.31%、39.04%、41.14%。由于铁合金粉芯和非晶的饱和特性较好,铁合金粉芯对过电压的陡度抑制较好,下文用铁合金粉芯磁环来进行对比试验。

#### 4.3 磁环长度对高频暂态过电压影响

以内外径 50/60 mm 为例,分别以长度 0.25、0.4、0.5、0.6 m 分析磁环长度对高频过电压的抑制效果。不同长度磁环过电压抑制波形见图 14,不同长度磁环仿真数据见表 5。

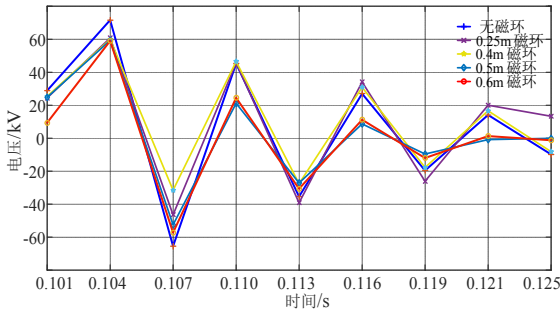


图 14 不同长度磁环过电压抑制波形

Fig. 14 Overvoltage suppression waveforms of magnetic rings with different lengths

表 5 不同长度磁环仿真数据

Table 5 Simulation data of magnetic rings of different lengths

磁环长度	最大峰值/kV	首峰时间/ $\mu\text{s}$	峰值陡度 $/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
无磁环	71.60	3.0	23.87
0.25 m 磁环	60.97	3.6	16.94
0.40 m 磁环	59.84	3.9	15.34
0.50 m 磁环	59.24	4.0	14.81
0.60 m 磁环	59.02	4.2	14.05

分析图 14 的仿真结果可知,0.6 m 的磁环对过电压抑制效果最好,磁环长度越长对过电压的陡度

有越好的抑制。由表 5 可以看出在 4 种不同长度的磁环下,其磁环对陡度的衰减为 29.03%、35.73%、37.95%、41.14%。磁环加阻尼电阻对过电压的幅值有明显抑制效果,抑制海上风电场重燃过电压的陡度的效果将增加,磁环越长,对重燃过电压的抑制效果越好。

#### 4.4 磁环内外径对高频暂态过电压影响

以长度 0.6 m 为例,分别以内外径 50/60、50/70、50/80 mm 来分析磁环对过电压的抑制效果。不同内外径磁环仿真波形见图 15,不同磁环内外径仿真数据见表 6。

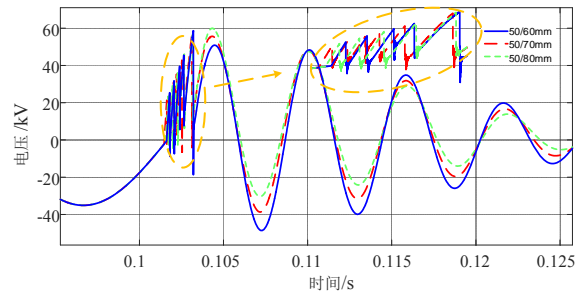


图 15 不同内外径磁环仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms of magnetic rings with different inner and outer diameters

表 6 不同磁环内外径仿真数据

Table 6 Simulation data of different inner and outer diameters of magnetic rings

内外径	最大峰值 /kV	首峰时间/ $\mu\text{s}$	峰值陡度 $/(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
无磁环	71.60	3.0	23.87
50/60mm	59.02	4.2	14.05
50/70mm	58.90	4.3	13.70
50/80mm	58.60	4.4	13.32

分析图 15 的仿真结果可知,内外径 50/80 mm 的磁环对过电压的陡度抑制最好,随着外径减小,抑制效果越弱。由表 6 分析可以得出其磁环对过电压陡度的衰减为 41.14%、42.60%、44.19%。当磁环的内径保持不变,外径增加时,磁环外径越大,磁环对过电压陡度的抑制效果越好。

#### 4.5 磁环体积参数对高频暂态过电压影响

以内径 50 mm,外径 60 mm,长度 0.6 m 为基

磁环体积, 改变磁环外径在 60~80 mm 范围变化分析体积的效果。相同体积不同磁环仿真波形见图 16, 相同体积不同磁环仿真数据见表 7。

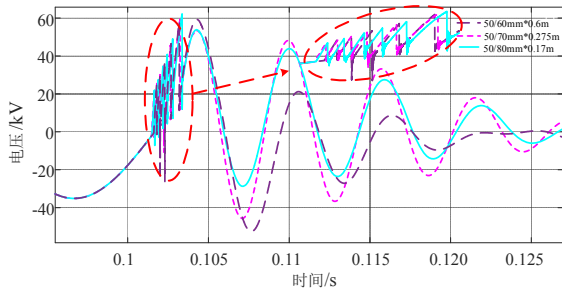


图 16 相同体积不同磁环仿真波形

Fig. 16 Simulation waveform of different magnetic rings with the same volume

表 7 相同体积不同磁环仿真数据

Table 7 Simulation data of different magnetic rings with the same volume

磁环体积	最大峰值 /kV	首峰时间/ $\mu$ s	峰值陡度 /(kV $\cdot\mu$ s $^{-1}$ )
无磁环	71.60	3.0	23.06
50/60 mm $\times$ 0.600 m	59.02	4.2	14.05
50/70 mm $\times$ 0.275 m	60.40	4.0	15.10
50/80 mm $\times$ 0.170 m	61.20	3.50	17.48

分析图 16 的仿真结果可知, 相同体积不同形状的磁环, 50/60 mm $\times$ 0.6 m 磁环的抑制效果最好, 衰减最快。由表 7 可看出, 相同体积不同磁环的抑制陡度的衰减为 41.14%、36.74%、26.77%。由此看出, 相同体积下, 磁环的横截面积越小, 其对抑制过电压的陡度越有效。

## 5 结论

针对海上风电场重燃过电压的防护, 提出利用磁环加阻尼电阻抑制重燃过电压的方法, 主要结论如下:

1) 仿真模拟试验中, 磁环加阻尼电阻能够减小重燃过电压的幅值, 降低了电路中产生的重燃过电压波的陡度, 建立的 ATP-EMTP 磁环模型基本符合实际。

2) 不同磁环材料的磁化曲线会影响磁环材料对

过电压陡度的抑制幅度, 由于铁合金粉芯的不易饱和程度更高, 所以抑制效果最好。增加磁环的外径和长度能加强磁环对重燃过电压的抑制效果, 磁环形状也对过电压抑制效果有一定影响, 体积一定时, 细长磁环抑制能力更强。

3) 35 kV 海上风电场使用磁环抑制重燃过电压的仿真显示, 此方法有效可行。在实际的海上风电场中, 需要根据具体电路结构和参数, 优化磁环大小、形状、长度的选取。

## 参考文献:

- [1] 郭亚勋, 刘刚, 江晓锋, 等. 考虑真空断路器重燃特性的海上风电场分闸过电压研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 60-65.  
GUO Yaxun, LIU Gang, JIANG Xiaofeng, et al. Switching-off overvoltage of offshore wind farm considering reignition characteristics of vacuum circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 60-65.
- [2] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 用磁环抑制 GIS 的 VFTO 的高电压模拟试验[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 1-3.  
XIANG Zutao, LIU Weidong, QIAN Jiali, et al. High voltage simulation tests of suppressing VFTO in GIS by magnetic rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 1-3.
- [3] 古一灿, 唐文虎, 辛妍丽, 等. 基于多尺度数学形态学和高低频能量比值的海上风电场内部瞬态过电压特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1702-1712.  
GU Yican, TANG Wenhui, XIN Yanli, et al. Feature analysis for transient overvoltage in offshore wind farm based on high and low frequency energy rate using multi-scale mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1702-1712.
- [4] 高凡夫, 谭向宇, 梁志瑞. 铁氧体磁环抑制 550 kV GIS 中的特快速暂态过电压的试验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 132-136.  
GAO Fanfu, TAN Xiangyu, LIANG Zhirui. Experimental study on suppressing VFTO in 550 kV GIS by ferrite beads[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 132-136.
- [5] 周岐斌, 程彧, 赵洋. 海上风电场断路器重燃过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(6): 62-68.  
ZHOU Qibin, CHENG Yu, ZHAO Yang. Analysis on restriking overvoltage of circuit breakers in offshore wind farms[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6): 62-68.

- [6] 关永刚, 郭珮琪, 陈维江, 等. 铁氧体磁环抑制 252 kV GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1977-1985.  
GUAN Yonggang, GUO Peiqi, CHEN Weijiang, et al. Test study on suppressing VFTO in 252 kV GIS by ferrite magnetic rings[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1977-1985.
- [7] 关永刚, 廖福旺, 岳功昌, 等. 应用高频磁环并联阻尼电阻抑制变压器雷电过电压的方法[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 149-154.  
GUAN Yonggang, LIAO Fuwang, YUE Gongchang, et al. An approach to suppress lightning overvoltage of transformer by high frequency magnetic ring with paralleled damping resistance[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 149-154.
- [8] XIN Yanli, ZHAO Baining, LIANG Qiheng, et al. Development of improved suppression measures against reignition overvoltages caused by vacuum circuit breakers in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 517-527.
- [9] 彭庆军, 姜雄伟, 司马文霞, 等. 真空断路器开断 35 kV 并联电抗器的三相建模仿真与过电压抑制研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 147-153.  
PENG Qingjun, JIANG Xiongwei, SIMA Wenxia, et al. Three-phase modeling of the vacuum circuit breaker switching off 35 kV shunt reactors and overvoltage suppression[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 147-153.
- [10] 吴俊臣, 王灵娇, 任志华, 等. 基于真空断路器预击穿特性的海上风电场集电网合闸暂态过电压仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 38-43.  
WU Junchen, WANG Lingjiao, REN Zhihua, et al. Simulation study on transient over-voltage in power collection network of offshore wind farm considering prestrike characteristics of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 38-43.
- [11] 周利军, 胡琛, 黄林, 等. 基于磁环的输电线路雷击过电压抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 186-191.  
ZHOU Lijun, HU Chen, HUANG Lin, et al. Lightning overvoltage suppression method based on magnetic ring for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 186-191.
- [12] 钱家骊. 高压开关开合电容电流和小电感电流[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.  
QIAN Jiali. High voltage Switch on and off capacitive current and small inductor current[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [13] 曲振旭, 王巨丰, 苏浩益, 等. 应用高频磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压和雷电过电压仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(1): 50-55.  
QU Zhenxu, WANG Jufeng, SU Haoyi, et al. Analysis and simulation of an approach to suppress very fast transient overvoltage and lightning overvoltage in gis by high frequency magnetic ring[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 50-55, 60.
- [14] 董琴, 刘卫东, 孙会刚. 磁环抑制真空重燃过电压的陡度[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 1-3.  
DONG Qin, LIU Weidong, SUN Huigang. Steepness suppression of vacuum restriking overvoltage by magnetic ring[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 1-3.
- [15] 南保峰, 刘轩东, 冯磊, 等. GIS 中 VFTO 防护措施研究综述[J]. 电瓷避雷器, 2017(6): 81-85.  
NAN Baofeng, LIU Xuandong, FENG Lei, et al. Review of research on VFTO protective measures in GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6): 81-85.
- [16] 王建东, 李国杰, 秦欢. 海上风电场内部电气系统合闸过电压仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 104-107.  
WANG Jiandong, LI Guojie, QIN Huan. Simulation of switching over-voltages in the collector networks of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 104-107.
- [17] SUN Qiuqin, ZHENG Zhi, HUANG Lei, et al. Investigation on reignition probability of switching overvoltage caused by vacuum circuit breaker in offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4438-4447.
- [18] SMUGALA D, PIASECKI W, OSTROGORSKA M, et al. Wind turbine transformers protection method against High-Frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 853-860.
- [19] 张文斌, 胡洋. GIS 中快速暂态过电压 VFTO 的抑制研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 418-431.  
ZHANG Wenbin, HU Yang. Research progress in suppression of fast transient overvoltage VFTO in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 418-431.
- [20] 杨大业, 宋瑞华, 项祖涛, 等. 海上风电交流送出系统谐振过电压事件产生原因及抑制措施[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 171-177.  
YANG Daye, SONG Ruihua, XIANG Zutao, et al. Reasons and suppression measures on resonant over-voltage events of offshore wind power AC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 171-177.
- [21] 金立军, 刘卫东, 钱家骊. 铁氧体磁环抑制 GIS 特快速

暂态过电压研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(7): 1-3.

JIN Lijun, LIU Weidong, QIAN Jiali. Research on the suppressing VFTO in GIS by ferrite ring[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(7): 1-3.

[22]CHRISTODOULOU C A, ASSIMAKOPOULOU F A, GONOS I F, et al. Simulation of metal oxide surge arresters behavior[C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 1862-1866.

方春恩(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能化电器理论(通信作者)(E-mail: fangchunen@163.com)。

王渊朝(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器(E-mail: 3265608019@qq.com)。