

面向同轴型特斯拉变压器初级多路注入的状态仿真与效果分析

刘磊¹, 祁沛晗¹, 夏小飞², 李斌¹, 俸波², 黎大健², 冯瑞发¹, 李敏¹, 潘锐健¹, 张磊²
(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 南宁 530023)

摘要: 对同轴型特斯拉变压器作为脉冲驱动源方案的强电磁脉冲模拟装置, 对特斯拉初级绕组开展同步注入是提升输出效果的有效途径, 对电磁脉冲模拟装置性能优化具有重要意义。面向典型同轴型特斯拉变压器初级注入结构, 研究初级绕组在不同注入条件下的电流分布状态和电阻、电感参数, 分析多路注入的优势与参数要求。在反极性电容放电型触发器的基础上, 建立触发仿真模型, 分析回路隔离参数对于触发效果的影响, 隔离宜采用电容隔离的方式, 且容值应远大于开关结构电容值。多路注入能显著降低初级绕组阻值, 提升电流分布均匀度, 降低初级绕组电感, 有效提高输出效率、降低磁芯重量。

关键词: 同轴型特斯拉; 初级绕组; 多路注入; 隔离参数; 变压器

State Simulation and Effect Analysis of Primary Multiple Injections in Coaxial Type Tesla Transformers

LIU Lei¹, QI Ruihan¹, XIA Xiaofei², LI Bin¹, FENG Bo², LI Dajian², FENG Ruifa¹, LI Min¹,
PAN Ruijian¹, ZHANG Lei²

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: For the strong electromagnetic pulse(EMP) simulation device using a coaxial Tesla transformer as a pulse driving source, synchronous injection into the Tesla primary winding is an effective way to enhance the output effect, which is of great significance to optimize the performance of the EMP simulation device. In this paper, focusing on the primary injection structure of a typical coaxial-type Tesla transformer, the current distribution and corresponding resistance and inductance parameters of the primary winding under different injection conditions are studied, and the advantages and parameter requirements of multiple injections are analysed. Based on the reverse-polarity capacitor-discharge trigger, the trigger simulation model is established to analyse the influence of loop isolation parameters on the triggering effect, and it is appropriate to use capacitive isolation, and the capacitance value should be much larger than the capacitance value of the switching structure. Multiple injections can significantly reduce the resistance value of the primary winding, improve the uniformity of current distribution, and reduce the inductance of the primary winding, in order to improve the output efficiency and reduce the weight of the magnetic core.

Key words: coaxial tesla; primary winding; multiple injections; isolation parameters; transformer

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U23B20132);广西电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20210264)。

Foundation item: Supported by the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China(U23B20132); the Science and Technology Project of Guangxi Power Grid Co., Ltd.(GXKJXM20210264).

0 引言

脉冲功率技术近些年发展迅速,从研制闪光脉冲X射线机开始,我国相继进行了相关高新技术研究^[1-2]。目前脉冲功率技术广泛应用于X光闪光灯、高功率微波、高功率激光和材料科学以及环境保护等领域^[3-5]。高功率脉冲源是高功率脉冲装置中的核心部分之一,目前主流的实现方式包括Marx发生器^[6-7]、特斯拉变压器等^[8-9]。1976年,俄罗斯大电流所(Institute of High Current Electronics, IHEC)首创同轴型特斯拉变压器与脉冲形成线的一体化技术路线,后续研制了SINUS系列加速器^[10-11];之后,为提高能量利用率,俄罗斯电物理研究所研发的RADAN系列加速器在此基础上采用续流方式对初级储能系统进行供电^[12],此结构能够充分发挥同轴型结构的绝缘利用率,实现高能量传输效率,成为目前特斯拉变压器相关研究的主流结构^[13-17],在高功率脉冲领域应用前景广阔。

输出脉冲幅值达到兆伏及以上量级的特斯拉变压器基于电气绝缘等方面的要求,体积重量较大,对于运输、组装尤其是架高实验等场景是不利的。特斯拉变压器的轻量化是研究难题,采用低变比、高气压SF₆气体绝缘等方式可一定程度缩小体积,减轻重量,但作用较为有限。可从特斯拉初级绕组的电流均匀性方面进一步研究如何提升特斯拉的输出效果,以进一步实现装置的轻量化,目前从此方面开展的相关研究少见报道。现有同轴型特斯拉变压器初级一般为宽薄铜带结构,匝数为单匝或数匝,初级注入条件多为单路注入,此时初级电流分布均匀性不佳,初级回路的杂散参数对输出效果影响较大,通过增加注入点提升初级电流分布均匀性,从而降低初级杂散参数,具有较大研究潜力^[18-25]。

针对同轴型特斯拉变压器相同的初级绕组结构,不同初级注入条件下的初级绕组电流分布均匀度不同,初级绕组电阻、电感值也受注入点位置及数量的影响。注入点数量越多,电流分布越均匀,对应的初级绕组电阻、电感值越小,其初级注入并联也能使得注入段杂散参数显著降低。本文基于典型同轴特斯拉变压器初级绕组结构进行建模计算,分析不同初级注入形式下的初级绕组参数。注入点数较少的条件下,居中位置注入较两侧位置注入效

果要好,但改善程度有限,多点注入较单点注入对电流分布均匀度和绕组电感降低等改善程度更为明显。分析不同触发时差条件下(同步性)多点注入对于初级绕组电流的影响,多路同步注入的效果明显优于单路注入;同步性越差,绕组电流波形的上升时间越久、幅值越低;储能电容容值越大,对于同步性的包容度也会相应提升。

1 特斯拉典型等效电路

对于输出前沿较快的特斯拉变压器,电路杂散参数对输出波形有较为明显的影响。针对变压器初级回路,由于电路初级杂散参数相较主绕组参数不可忽略,外注入电路的杂散电阻明显高于初级绕组电阻,杂散电感和初级绕组自感在同一数量级,也不可忽略,因此厘清杂散参数对电路的作用规律,是实现特斯拉变压器高性能、稳定功率输出的关键前提。

常用双谐振等效回路对特斯拉变压器进行电路等效,双谐振等效回路简单、易求解,考虑关键杂散参数影响的特斯拉等效谐振电路模型如图1所示,其中 C_1 与 C_2 分别为初级、次级电容值, S 为触发开关, L_p 与 L_s 分别为初级绕组和次级绕组的自感, M 为初级、次级绕组之间的互感, L_{s1} 与 L_{s2} 分别为初级、次级的杂散电感, R_{s1} 与 R_{s2} 分别为初、次级的杂散电阻。本模型计入了初级回路杂散电阻与杂散电感带来的电路效应。

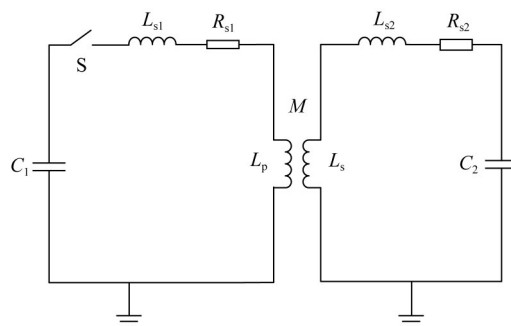


图1 特斯拉变压器等效谐振电路模型

Fig. 1 Tesla transformer equivalent resonant circuit model

特斯拉变压器在初级侧和次级侧同时存在电阻损耗,特斯拉变压器为升压变压器,由于初级侧电流远大于次级侧,电阻损耗与电流二次方成正比,其损耗明显大于次级侧。电阻损耗可分为初级绕组电阻损耗和初级杂散电阻损耗。绕组电阻损耗是初

级绕组本身电阻造成的损耗,此部分电阻损耗较小;初级杂散电阻损耗与初级注入侧的结构相关,主要包括火花通道电阻、储能电容器电阻以及结构电阻引起的电阻损耗,不同的初级侧结构引起的电阻损耗不同,需要进行具体分析。

一般而言,特斯拉变压器初级绕组按照典型单匝薄铜板结构进行估算,其电阻值一般介于数十微欧到数百微欧之间,次级线圈圈数较多,自身电阻为百毫欧量级。初级绕组单点注入条件下,初级杂散电阻值在数十毫欧量级,明显高于初级绕组电阻,占主导地位,初级绕组电阻作为次要因素在电阻损耗分析时可忽略。参照上述电路原理图,建立电路仿真模型,在单注入点情况下,考虑到初级电路的电容器、火花通道、结构连接等因素,数十毫欧是较为合理的取值范围,初级杂散电阻暂取 $20\text{ m}\Omega$,初级杂散电感暂取 50 nH ,电感取初级储能电容 $C1$ 上电压设置为 5 kV 。暂不考虑回路整体振荡、电磁过程与次级输出开关等因素,初级、次级电感和次级电容采用已设计完成的特斯拉变压器参数,分别为 791 nH 、 12.56 mH 、 125 pF 。磁耦合系数暂设置为 0.9 ,此时典型次级电压波形如图 2 所示。

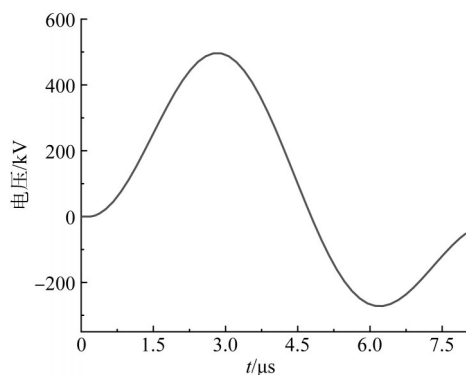


图 2 典型特斯拉变压器次级电压波形

Fig. 2 Secondary voltage waveform of typical Tesla transformer

2 特斯拉初级绕组不同注入条件计算

2.1 初级绕组结构

强电磁脉冲环境要求输出电压较高,脉冲上升时间较快。典型特斯拉初级绕组多采用毫米级厚度的长轴向黄铜薄板卷绕而成。为了直观分析不同注入方式下的特斯拉初级侧电流分布,采用此结构建立计算模型,设计了可多路同步注入绕组结构,径向长度取 $1\text{ }000\text{ mm}$,外半径取 200 mm ,厚度为 2

mm 。其中 1、3、5、7、9、11 为接地点,2、4、6、8、10 为电流注入点,共 5 路注入点。各点均排列在同一轴向线上,除两端接地点位置外,各点距离相等均为 100 mm ,电流注入端与接地端间隙距离取 10 mm ,结构如图 3 所示。可根据条件改变电流注入位置,从而得到不同初级电流的分布状态。计算设置在直流稳态条件下,暂不考虑高频下趋肤效应导致电流分布不均的情况。

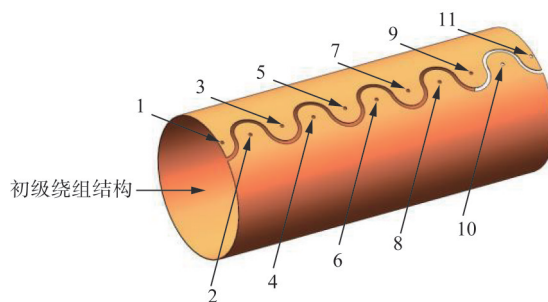


图 3 特斯拉变压器初级绕组建模结构

Fig. 3 Modelling structure of Tesla transformer primary winding

2.2 初级电流分布

在理想情况下,设置两端位置均匀接入注入侧和接地侧,端边位置为波纹型间隙的对边,得到电流分布如图 4(a)所示,在注入侧和接地侧的波纹内曲位置电流密度稍高于其他位置,整体分布较为均匀。实际工程情况下注入和接地位置只能取 1—11 各点位置,将 6 个奇数接地点均接地,5 个偶数注入点进行同步电流注入,得到电流分布如图 4(b)所示,在注入点和接地点各位置电流分布稍大,约为绕组其他位置的两倍左右,这是因为此位置的电流截面面积较其他位置缩减一半以上,整体电流分布较为均匀。

电流分布最不均匀情况为单点接地条件下的单点注入方式,3 号端口接地,其余 5 点注入端口各自注入的电流分布如图 5 所示,可以看出电流密度最大位置仍为电流注入端口周围,其余位置电流分布较为均匀,单点注入时整体电流分布不均匀程度较多点注入显著提高。采用多网格梯度进行计算时的电流分布情况基本一致,可以认为电流分布状态计算有较高的可靠性。

对于多接地点同时接地条件下的单点注入,2 号点、4 号点、6 号点 3 种电流注入方式对应电流分布如图 6 所示,可以看出电流密度较大位置均为电流注入端口,此 3 种条件下的电流密度最大值差别

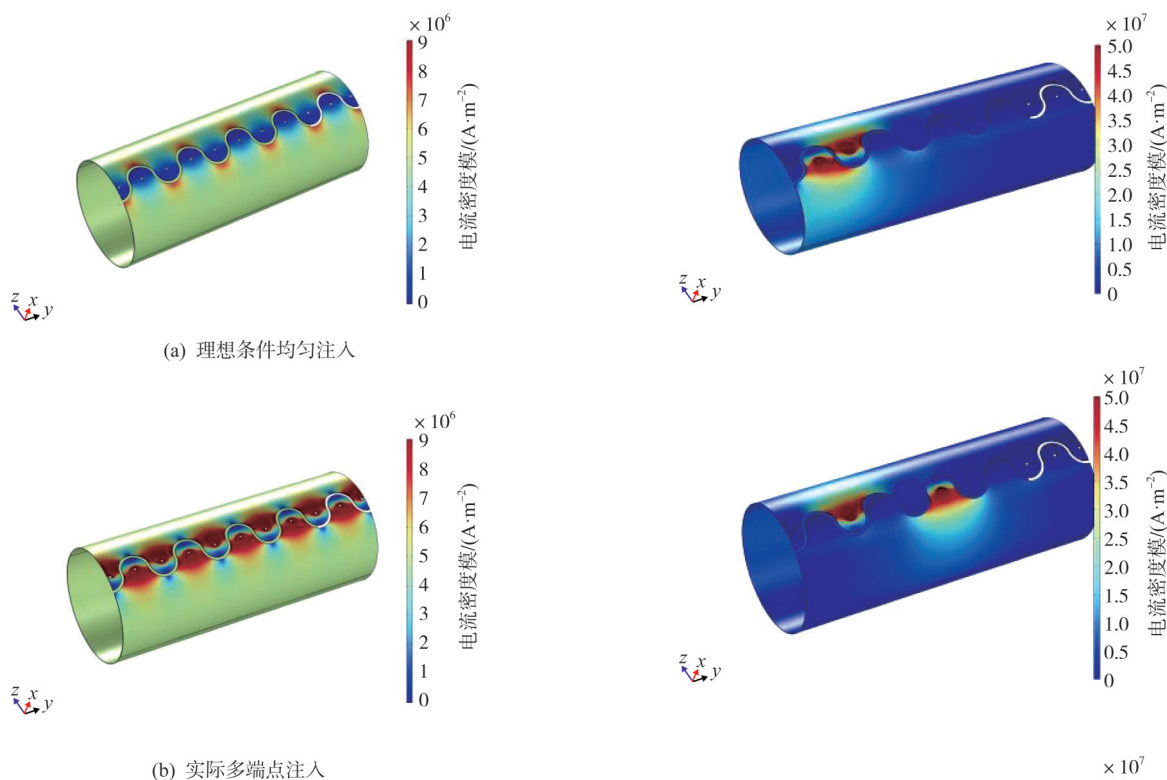


图 4 不同注入方式电流分布

Fig. 4 Current distribution for the different injection methods

不大,注入点在中间位置时注入端口电流密度分布较侧边位置要稍均匀些,但改善程度极其有限。对比图 5,多端点接地使得接地端位置的电流分布均匀度大大提升;对比图 4,在注入端位置的均匀度明显下降。综上可以看出理想情况下的电流分布最为均匀,实际工程实现中的最佳情况为多点接地和多点注入,电流分布均匀性也较好,在多点接地条件下注入点越少、注入位置越偏离中心位置,初级电流分布均匀性越低,其中注入点数量的影响远大于注入位置的影响。

2.3 电阻计算

不同注入情况下的初级绕组阻值变化趋势如图 7 所示,表 1 为不同注入情况下的初级绕组阻值。1 号端口位置在最边缘处,边缘端口的电流截面积约为普通端口的一半,1 号端口接地时电阻明显较大,亦表明其不均匀程度较高。接地时,在接地点为 1 号、3 号、5 号端口和全接地条件下分别计算了不同注入点的电阻值,其值可间接反映电流分布的均匀性程度,计算结果如表 1 所示。在单端口接地和注入条件下,端口位置越接近绕组中间,阻值越

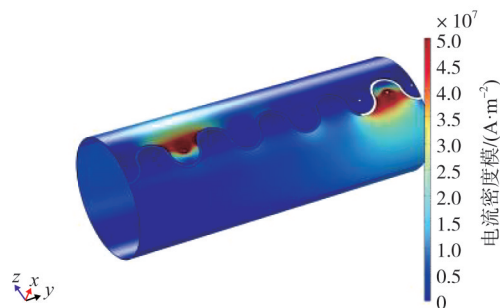


图 5 不同注入位置电流分布(3号端口接地)

Fig. 5 Current distribution at different injection locations (port 3 grounded)

小;全接地条件下,电流注入端口越多,阻值越小,但增加注入端数量以降低绕组电阻的优化效果存在饱和特性。在注入端口数量一致时,端口位置靠近绕组中间,阻值会有所降低,但效果明显低于注入端口数量的影响。

2.4 电感计算

以上电流分布情况对初级绕组自感的影响并未有直观体现。以注入初级绕组、磁芯和外结构为主体,在各端口位置设置注入金属柱体,建立三维模型。磁芯长度设置为 2 m,材料设置相对磁导率为 2 000,金属设置为铜,其余位置设置为空气,频率设置为 1 kHz,计算磁通密度模型如图 8 所示。由于实际特斯拉结构中磁芯参数和次级绕组缠绕结

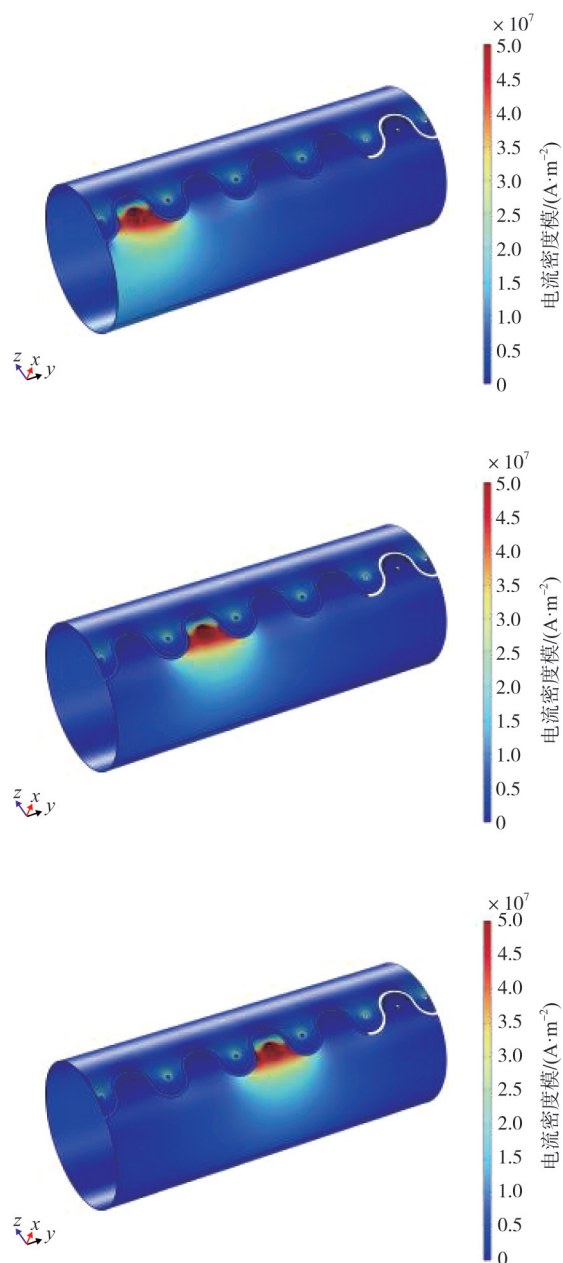
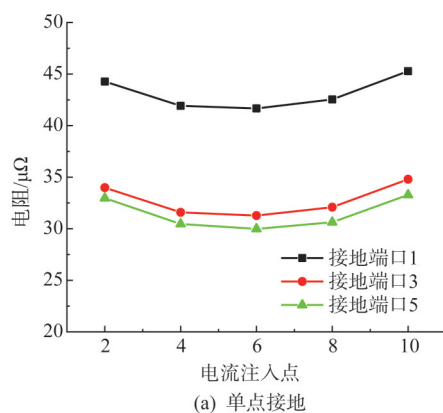


图6 全接地单点注入电流分布

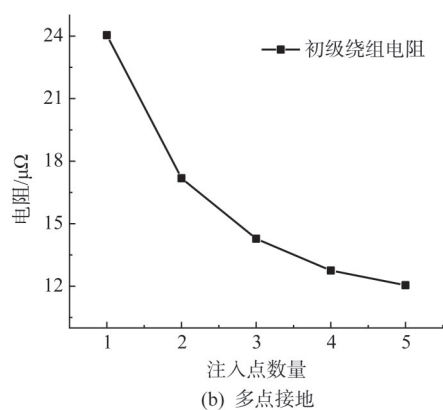
Fig. 6 Current distribution under fully grounded single-point injection

构方式等不同, 导致初级电感值会有较大变化, 但并不影响对于不同电流分布造成的电感量相对变化的定性分析。

单点和多点注入的初级绕组电感值变化趋势如图9所示, 单端口接地和单端注入条件下电感最大值为两相距最远的端口分别接地或注入的情况, 电感值为270.3 nH, 电感最小值为两相距最近、位置最居中的端口分别为接地或注入的情况, 电感值为



(a) 单点接地



(b) 多点接地

图7 不同端口注入与接地的绕组阻值

Fig. 7 Winding resistance for injection and grounding at different ports

表1 不同注入点、接地点条件下的初级绕组阻值

Tab. 1 Resistance values of primary winding under different injection point and grounding point conditions

接地条件	注入条件	阻值/ $\mu\Omega$
1号端口接地	6号端口注入	41.667
3号端口接地	6号端口注入	31.274
5号端口接地	6号端口注入	29.987
全接地	2号端口注入	24.045
全接地	2、4号端口注入	17.183
全接地	2、4、6号端口注入	14.277
全接地	2、4、6、8号端口注入	12.753
全接地	2、4、6、8、10号端口注入	12.051

203.95 nH, 端口位置越居中, 注入端口和接地端口距离越近, 初级绕组电感越小。5点注入与单点注入相比, 电感从186.97 nH下降到132.22 nH。表2为单点接地和全端口接地的电感值, 相较于单点接地, 多点共同接地的初级绕组电感降低效果优于仅端口位置的选择, 此时最低为居中6号端口位置注入, 电感值下降到169.15 nH。全接地条件下,

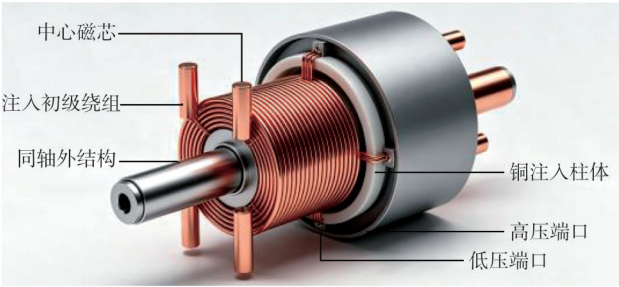


图 8 三维计算模型

Fig. 8 3D computational model

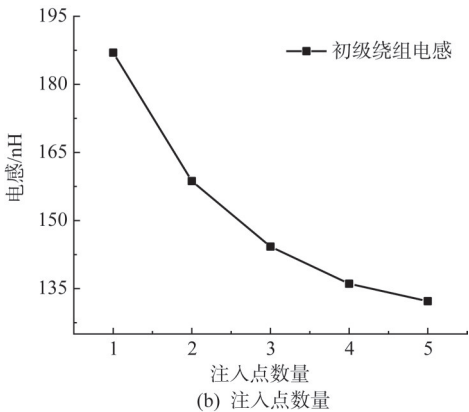
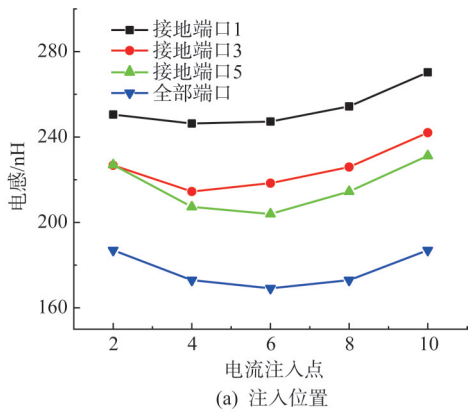


图 9 不同端口注入与接地的绕组电感

Fig. 9 Winding inductance for different port injections and grounding

电流注入端口越多,电感值越小,随着注入点数量的增加,呈现饱和趋势,说明注入点数量并非越多越好,要综合考虑整体结构设计、配套开关尺寸和触发器带负载能力等因素选取合适的多点注入方案。在注入端口数量相同时,端口位置越居中,电感值越低,但位置改变远不如注入端口数量的增加产生的效果明显。电感降低能有效降低对于特斯拉磁芯的要求,降低磁芯配重,从而降低装置配重,提升轻量化水平。

表 2 不同注入、接地条件下的初级绕组电感值

Tab. 2 Inductances of the primary winding under different injection and grounding conditions

接地条件	注入条件	电感值/nH
1号端口接地	6号端口注入	247.23
3号端口接地	6号端口注入	218.38
5号端口接地	6号端口注入	203.95
全接地	2号端口注入	186.97
全接地	2、4号端口注入	158.69
全接地	2、4、6号端口注入	144.25
全接地	2、4、6、8号端口注入	136.08
全接地	2、4、6、8、10号端口注入	132.22

3 隔离参数与触发同步性的影响仿真

3.1 隔离参数选取与效果分析

通常触发器输出端等效电阻阻值无法等效为无穷大,以面向本文研制的电容快放电型五路输出触发器为例,其输出端等效电阻为 $2.5\text{ k}\Omega$ 。触发器输出端若直接连接触发极,会破坏触发极悬浮电位状态使其等效接地,开关内部高压极和触发极位置电场加大,导致开关无法工作在较高欠压比状态下,影响开关工作性能。带有隔离元件的开关触发等效电路如图 10 所示, C_1 、 C_2 分别为触发器内部和开关电容组的储能电容, R_1 为触发器内部的释能电阻(输出端等效电阻),阻值为千欧量级, C_{S1} 、 C_{S2} 分别为开关高压极与触发极、触发极与接地极的结构电容, R_{S1} 、 R_{S2} 分别为开关高压极与触发极、触发极与接地极的等效电阻,未导通状态开路,此阻值极大。当 C_2 施加直流电压 U 后,开关高压极电压为 U ,触发极电位悬浮为 U_s ,当取值较为合理时,开关自击穿电压较高,当触发器输出电缆与开关触发极连接后,如无隔离元件,触发极通过输出电缆和 R_1 接地, R_1 的数值远小于 R_{S1} 、 R_{S2} ,经由电阻分压,触发极近似等效接地,使得开关内部电场分布不佳,自击穿电压显著降低。为避免开关触发极通过端口电阻接地影响开关工作效果,在触发电路端口与开关触发极要采取隔离措施。考虑到此因素,如需测量触发极信号,不宜采用电阻分压器,否则同样会引起触发极等效小电阻接地,导致开关内场分布不佳,导致工作电压下降。

隔离元件可选用电容、电阻、电感单一器件或多种器件组合,其中电容具备优良的隔直流通交流

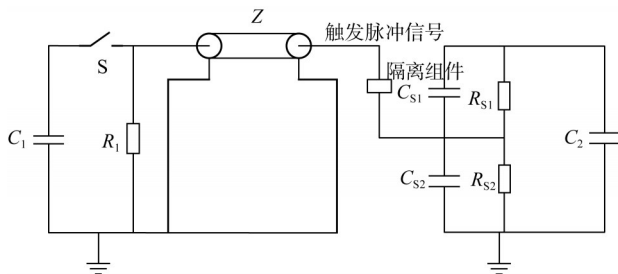


图 10 开关电容触发等效电路

Fig. 10 Switching capacitance trigger equivalent circuit

特性,合理选取电容容值,理论上能够获得理想的隔离效果。电阻和电感无隔直流作用,电阻能调节脉冲进入开关的能量,电感在直流条件下相当于导线,单独电阻、电感无法实现有效隔离,两者均与电容串联合进行仿真,对比的触发隔离方式如图 11 所示。经计算,开关结构中高压极和接地极间、高压极和触发极间、触发极和接地极间结构电容均在皮法量级。根据对开关结构电容的仿真结果, C_{S1} 、 C_{S2} 取值分别为 9 pF、6.5 pF, R_{S1} 、 R_{S2} 在开关内部两间隙未导通时无穷大,均设置为 1 T Ω 。

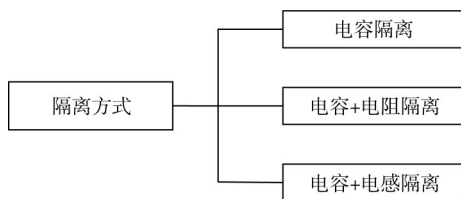


图 11 触发隔离方式

Fig. 11 Trigger isolation mode

隔离电容值对于触发极脉冲波形的影响如图 12 所示。在隔离电容值远大于触发极和接地极电容 6.5 pF 时,可以认为触发脉冲电压完全加载到触发极上。隔离电容和触发极与接地极的结构电容 C_{S2} 形成电容分压,隔离电容值越大, C_{S2} 上分压越高,与开关高压极与触发极间结构电容无关,电容隔离对于脉冲上升时间无影响。隔离电容取值宜在纳法量级以上,可避免储能电容充电后触发极的悬浮电位改变影响开关性能,同时不影响触发脉冲的加载。

若单独使用隔离电阻,其阻值应与 R_{S2} 处于同一数量级;若电阻取值过大,仿真结果显示脉冲信号无法正常加载至触发极。为此本文采用隔离电阻与隔离电容串联的复合隔离方案开展仿真分析,统一选用 1 nF 电容作为隔离电容。在触发脉冲注入

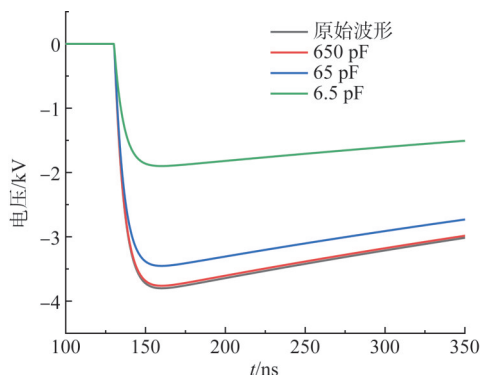


图 12 隔离电容容值对于脉冲施加波形的影响

Fig. 12 Effect of isolation capacitance on pulse applied waveforms

位置串联电阻,可削减进入触发极的脉冲能量,更改电阻值可调节注入能量,同时隔离电阻可以对触发电路起到一定保护作用。隔离电阻值对于触发极脉冲波形的影响如图 13 所示。根据仿真结果,隔离电阻阻值对于脉冲上升时间有影响,电阻阻值在 500 Ω 以下时影响不显著,当阻值达到千欧及以上量级时,会显著影响脉冲的上升时间,阻值越大,脉冲上升沿越缓,脉冲上升时间的增加和隔离电阻阻值基本呈正相关,脉冲幅值也会随电阻阻值的增加小幅度降低。脉冲上升时间的增加和脉冲幅值的降低理论上对于开关的快速触发导通是不利的,可根据实验条件考虑隔离电阻的使用和阻值的选取。

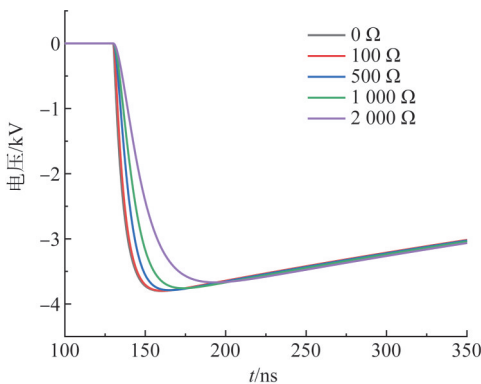


图 13 隔离电阻阻值对于脉冲施加波形的影响

Fig. 13 Effect of isolation resistance values on pulse applied waveforms

隔离电感值对于触发极脉冲波形的影响如图 14 所示。根据仿真结果,隔离电感会导致脉冲波形产生振荡,隔离电感值大于 200 nH 造成的振荡已较为明显,随着电感值的增加,振荡会不断加剧,降低输出高压脉冲质量,电感隔离并非一种合适的

隔离形式。

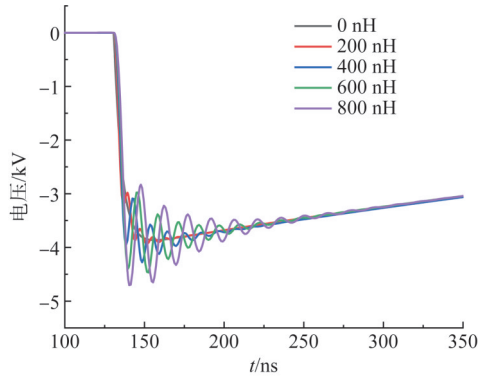


图 14 隔离感值对于脉冲施加波形的影响

Fig. 14 Effect of isolation resistance values on pulse applied waveforms

3.2 多路注入同步性影响分析

对于特斯拉产生强电磁环境的实施方案,在特斯拉初级线圈的电流注入中,若采用单节点注入方案,气体开关的导通采用电磁传动装置即可高效实现,但其电流分布均匀性较差,且不利于初级回路杂散参数的降低。采取多组开关电容的多点并联注入可以提升初级电流的均匀分布,有利于降低初级绕组本身电感电阻参数;另一方面多组开关电容并联能较大程度降低初级回路的杂散参数。由于对开关同步性要求较高,采用三电极触发开关同步触发方案,多路开关的同步导通要借助多路同步触发装置实现,并且同步路数越多,对其触发同步性要求高。此时特斯拉初级同步注入的效果,关键决定于多路触发器的输出效果和初级开关电容的设计。

多组开关电容放电同步性是多节点注入方式的核心研究内容,其对特斯拉装置输出性能影响显著,因此系统对电容放电同步精度要求较高。利用不同时差下同步开关对于初级线圈电流的影响,可观察不同同步性下的电流注入效果。实际应用时开关电容一体化装配安装在特斯拉腔体的电流注入孔端。

多端口同步注入电路如图 15 所示。其中 C_1 与 C_2 为初级、次级电容, S 为触发开关, L_p 与 L_s 分别为初级绕组和次级绕组的自感, M 为初级、次级绕组之间的互感, L_{s1} 与 L_{s2} 分别为初次级两侧的杂散电感, R_{s1} 与 R_{s2} 分别为初、次级的杂散电阻。 R_{s1} 主要取决于开关火花通道电阻和初级电容器杂散电阻,火花通道电阻在毫欧级。 R_p 为初级线圈电阻,

一般在毫欧量级以下,如 3.1 节仿真所得,数十微欧量级,此处可忽略其影响。

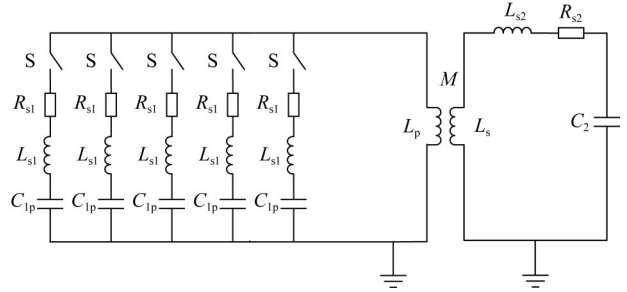
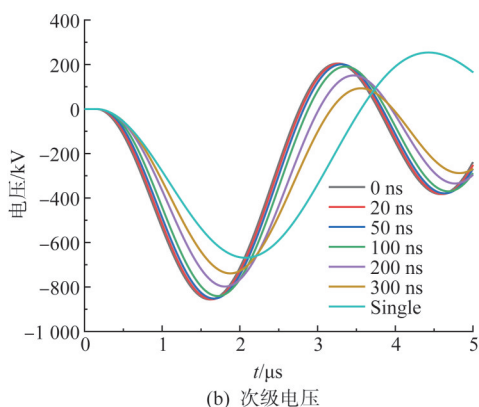
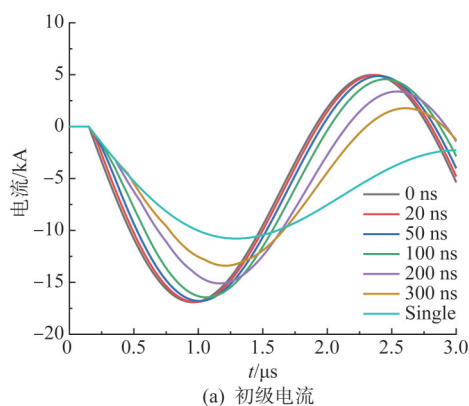


图 15 多端口同步注入电路图

Fig. 15 Multi-port synchronous injection circuit diagram

L_p 与 L_s 分别为初级绕组和次级绕组的自感,分别设置为 791 nH、12.56 mH;磁耦合系数设置为 0.93; L_{s1} 与 L_{s2} 分别为初次级两侧的杂散电感,分别设置为 200 nH、0.2 μ H; R_{s1} 与 R_{s2} 分别为初、次级的杂散电阻,分别设置为 70 m Ω 、1 Ω ; C_2 设置为 125 pF。初级储能电容多采用数微法电容,此处放电总电容采取 8 μ F,5 组储能电容值设置均为 1.6 μ F。以各路储能电容放电击穿时刻差值表征多开关触发同步性(以下简称同步性)开展仿真,时差分别设置为 0 ns、20 ns、50 ns、100 ns、200 ns、300 ns。图 16 为该条件下不同同步性下的初级电流和次级电压波形,同步性对于峰值时间都有明显影响,同步性越差,峰值时间越长,峰值时间与同步性呈正相关。同步性降低会使得初级电流幅值下降,但影响不显著。放电电容容值越小,放电速度越快,初级电流幅值越低,此时同步性对输出电流的影响增大。对比单路注入和多路注入的特斯拉次级输出波形,多路注入条件下的输出效率和峰值时间都优于单路注入,即使在多路注入同步性不佳时仍是如此,表明此状态下多路注入具有较大优势。可以认为各开关击穿时差低于 50 ns 时的同步性能较好,脉冲输出较为理想,此时各开关触发时延抖动应低于 15 ns。

同步性较差条件下的注入效果不佳,峰值时间显著增加,幅值明显降低,降低特斯拉输出效果。为比较不同储能电容对同步性的要求,放电总电容采取 2 μ F 与 8 μ F 作为对照,5 组储能电容值设置均为 0.4 μ F。其他参数设置与上文保持一致,时差分别设置为 0 ns、20 ns、50 ns、100 ns、200 ns、300 ns 的初级电流和次级电压波形如图 17 所示,同步

图 16 不同同步性下的波形(8 μF)Fig. 16 Waveforms under different synchronisations(8 μF)

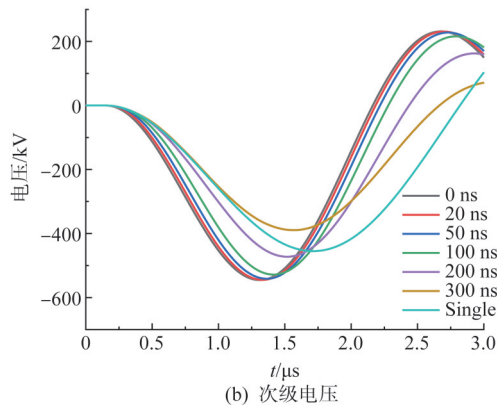
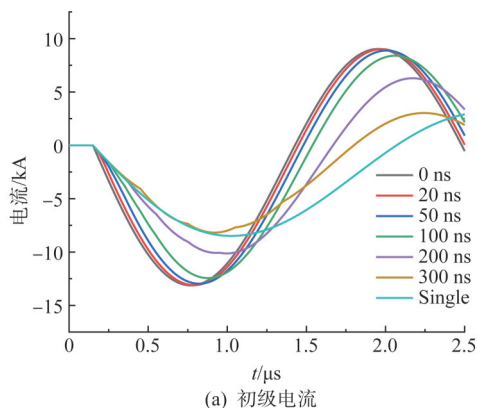
性降低会使得初级电流幅值下降。可以认为各开关击穿时差低于 50 ns 时的同步性能较好, 脉冲输出较为理想, 提升触发开关的同步效果是保证特斯拉装置高效输出的关键因素之一。

4 结论

本文面向典型同轴特斯拉初级绕组结构进行建模计算, 分析了不同注入形式下的初级绕组参数和不同隔离参数下的触发极脉冲特性, 得出以下结论。

1) 初级绕组杂散参数对特斯拉输出效果有显著影响, 注入点数量较少的条件下, 居中位置注入较两侧位置注入效果要好, 但改善程度有限, 多点注入较单点注入对电流分布均匀度和杂散电感等改善效果更为明显。

2) 触发极隔离连接的参数仿真结果表明, 隔离电容值远大于开关结构电容时, 可以认为触发脉冲全部施加在触发极上; 隔离电阻会对脉冲上升沿产生较大影响, 且阻值越大, 上升沿越缓, 如需要进

图 17 不同同步性下的波形(2 μF)Fig. 17 Waveforms under different synchronisations(2 μF)

行电阻隔离削减进入开关的能量, 阻值不宜过大。

3) 电路仿真结果表明同步性越差, 绕组电流波形的上升时间越久、幅值越低, 同时储能电容容值越大, 对于同步性的包容度也会对应提升, 较差同步性下多端口注入的输出效果仍优于单端口注入, 多端口注入的输出效果提升显著。

参考文献

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 孙凤举, 邱爱慈, 魏浩, 等. 快 Z 箍缩百太瓦级脉冲驱动源概念设计的发展[J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 15-26.
SUN Fengju, QIU Aici, WEI Hao, et al. Development of conceptual design on fast Z-pinch pulsed power driver with hundreds of terawatt [J]. Modern Applied Physics, 2017, 8 (2): 15-26.
- [3] SHELKOVENKO T A, PIKUZ S A, HAMMER D A. A review of projection radiography of plasma and biological objects in X-Pinch radiation [J]. Plasma Physics Reports, 2016, 42(3): 226-268.
- [4] MEHLHORN T A. National security research in plasma physics and pulsed power: past, present, and future [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(5): 1088-1117.
- [5] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版

- 社, 2016.
- [6] 张帆, 何鹏军, 孔亮, 等. 宽带强电磁脉冲模拟器发展及设计研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 87-92.
- ZHANG Fan, HE Pengjun, KONG Liang, et al. Survey and design study of mesoband high power electromagnetic pulse radiator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1): 87-92.
- [7] 侯民胜, 秦海潮. 强电磁脉冲模拟技术[J]. 高电压技术, 2008(2): 409-412.
- HOU Mingsheng, QIN Haichao. Simulation technology of intensive electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2008(2): 409-412.
- [8] CHEN Z, JIA W, WU W, et al. Development of a 3 MV coaxial peaking capacitor for large-scale electromagnetic pulse simulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(11): 114702.1-114702.12.
- [9] ZHAO Y, XIE W, JIANG J, et al. Replacement of marx generator by Tesla transformer for pulsed power system reliability improvement[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 574-580.
- [10] GUBANOV V P, KOROVIN S D, PEGEL I V, et al. Compact 1000 pps high-voltage nanosecond pulse generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2): 258-265.
- [11] MESYATS G A, KOROVIN S D, GUNIN A V, et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines[J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(2): 197-209.
- [12] MESYATS G A, KOROVIN S D, ROSTOV V V, et al. The RADAN series of compact pulsed power Generators and their applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7): 1166-1179.
- [13] 何石. Tesla变压器磁耦合及复合磁耦合及复合绕组电压振荡过程研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- [14] 厉天威, 刘磊, 贾磊, 等. 电网设备防御强电磁脉冲试验平台建设研究[J]. 南方电网技术, 2025, 19(1): 12-19.
- LI Tianwei, LIU Lei, JIA Lei, et al. Construction of the strong electromagnetic pulse defense test platform for power grid equipment[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(1): 12-19.
- [15] 夏小飞, 刘磊, 俸波, 等. 变电站典型控制线缆高空电磁脉冲耦合特性仿真方法[J]. 南方电网技术, 2026, 20(4): 153-162.
- XIA Xiaofei, LIU Lei, FENG Bo, et al. Simulation method of coupling characteristics of shielded multi-core cable in HEMP environment[J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(4): 153-162.
- [16] 张鸣, 吴卫堃, 李甜, 等. 考虑频变参数的交联聚乙烯电缆中典型电磁脉冲的传播特性[J]. 南方电网技术, 2020, 14(9): 29-36.
- ZHANG Ming, WU Weikun, LI Tian, et al. Propagation characteristics of typical electromagnetic pulses in cross-linked polyethylene cable with frequency-dependent parameters[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(9): 29-36.
- [17] 邹军, 杨帅, 程启问. 电力高压设备高性能有限元电磁仿真方法综述与展望[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 1-8.
- ZOU Jun, YANG Shuai, CHENG Qiwen. Review and outlook of high performance finite element electromagnetic simulation methods for high voltage electrical equipment[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 1-8.
- [18] 杨晓峰, 唐波, 张建功, 等. 短波频段高压输电线路的电磁散射场及其影响因子[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 18-25.
- YANG Xiaofeng, TANG Bo, ZHANG Jiangong, et al. Electromagnetic scattering field and influencing factors of high voltage transmission lines in shortwave frequency band[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(10): 18-25.
- [19] 洪潮, 张庆华, 张野, 等. 基于J-A磁滞模型的高效电磁暂态变压器建模[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 75-83.
- HONG Chao, ZHANG Qinghua, ZHANG Ye, et al. Efficient electromagnetic transient modeling of transformer based on J-A hysteresis model[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 75-83.
- [20] 程显, 李泰煜, 葛国伟, 等. 基于特斯拉变压器的重频脉冲源输出特性分析及优化[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2149-2157.
- CHENG Xian, LI Taiyu, GE Guowei, et al. Analysis and optimization of output characteristics of repetitive pulse generator based on Tesla transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2149-2157.
- [21] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
- LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [22] 向飞, 谭杰, 罗敏, 等. 多模块快直线变压器高功率脉冲源的研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 288-292.
- XIANG Fei, TAN Jie, LUO Min, et al. Fast linear transformer high power pulse generator[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 288-292.
- [23] 李黎, 刘云龙, 俞斌, 等. 螺旋线型特斯拉变压器谐振充电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 145-151, 18.
- LI Li, LIU Yunlong, YU Bin, et al. Study of the resonant charging performance based on spiral Tesla transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(33): 145-151, 18.
- [24] 曾祥耀, 饶玉凡. 特斯拉变压器的理论分析与仿真[J]. 电器工业, 2010(7): 41-44.
- ZENG Xiangyao, RAO Yufan. Theoretical analysis and simulation on tesla transformer[J]. China Electrical Equipment Industry, 2010(7): 41-44.
- [25] 刘帅宏, 王战亮, 张亚斌, 等. 小型特斯拉变压器脉冲源的研究[C]//中国电子学会真空电子学会第十九届学术年会, 2013年9月, 中国北京. 北京: 中国电子学会真空电子学会中国电子学会, 真空电子学会第十九届学术年会论文集(下册), 2013: 370-373.

收稿日期: 2024-05-06; 网络首发日期: 2024-10-28

作者简介:

刘磊(1982), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 从事高电压与绝缘技术中外绝缘与电磁环境、复合横担、架空导线研究工作, liulei@csg.cn;

祁沛晗(1991), 女, 通信作者, 高级工程师, 博士, 研究方向为高电压与绝缘、电磁暂态分析, jiuxuhh@163.com;

夏小飞(1981), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为输变电设备研究和运维技术。