

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241734

高压输电线路低电流 CT 取能技术研究

程志远, 桑卓, 袁鑫, 徐晓杰, 吴亚伦, 李东东

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对电流互感器(current transformer, CT)取能装置在输电线路低电流时无法实现在线监测设备实时供电的问题, 提出了一种谐振式 CT 取能方法和与之相对应的优化方法。首先, 通过理论分析构建了综合质量-互感-损耗的数学优化模型。然后, 采用第二代遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)进行最优设计, 确定了 CT 机械尺寸、补偿电容及匝数等关键性参数, 从而极大提升了 CT 取能装置的输出功率。最后, 仿真和实验结果表明, 在输电线路电流低至 15 A 的工况下, 所采用的谐振式 CT 取能优化方法可使输出功率提升至 2.186 W, 约为相同条件下传统 CT 取能方法的 6 倍, 实现了输电线路在线监测设备电源的不间断供给。

关键词: 高压输电线路; 谐振补偿; 磁芯优化; 电流互感器

Research on low current CT energy harvesting technology for high voltage transmission lines

CHENG Zhiyuan, SANG Zhuo, YUAN Xin, XU Xiaojie, WU Yalun, LI Dongdong

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To address the issue that current transformer (CT) energy harvesting devices are unable to provide real-time power supply to online monitoring equipment under low current conditions in transmission lines, a resonant CT energy harvesting method and its corresponding optimization method are proposed. First, a comprehensive mathematical optimization model integrating quality factor, mutual inductance, and losses is established through theoretical analysis. Subsequently, the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is employed to perform optimal design, determining key parameters such as CT mechanical dimensions, compensation capacitance, and number of turns. This significantly enhances the output power of the CT energy harvesting device. Finally, simulation and experimental results demonstrate that under a transmission line current as low as 15 A, the proposed self-resonant CT energy harvesting method achieves an output power of 2.186 W—approximately 6 times higher than that of conventional CT-based methods under the same conditions—thereby enabling uninterrupted power supply for transmission line online monitoring equipment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877129).

Key words: high-voltage transmission lines; resonant compensation; magnetic core optimization; current transformer

0 引言

随着新型电力系统传感网络的广域部署, 大量在线监测设备以及集成先进传感器广泛应用于输电线路^[1-5]。目前, 此类监测设备供能方式主要有蓄电池^[6]、太阳能^[7]、激光取能^[8]、风能^[9]及电流互感器(current transformer, CT)取能^[10]等。其中, CT 取能方式因其安全性高、实用性强、适用范围广、功率高、造价低和可实现在线监测设备实时供电等优

点, 解决了传统供电方式的诸多弊端, 有望成为解决高压输电线路在线监测设备最为有效的供电方式^[11-13]。

采用 CT 取电方式虽然优势明显, 但由于输电线路所处电网负荷具有极大的不确定性, 使得输电线路电流从十几至上千安培内变化, 在如此宽泛的电流范围设计出稳定功率输出的 CT 取电装置并非易事。对于较大电流工作情况, 会导致 CT 取能过剩, 一般可通过卸荷、增大 CT 磁芯气隙等方法解决^[14-15], 而针对低电流下取得足额功率是首要解决的问题, 否则无法保证输电线路在线监测设备获取

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877129)

实时不间断电源,进而危及电力系统安全。为此,已有大量学者针对此问题展开研究。诸多研究通常采用增大磁芯的横截面积^[16]或采用高导材料^[17]制作磁芯的方法来提高取能功率,但前者提升功率幅度较低,后者容易造成磁芯过早饱和。在此基础上,文献[18]采用高导磁率磁芯的同时在副边设置多次抽头绕组,可有效提高输出功率并防止磁芯饱和,但机械结构容易动作故障且受限于取能空间;文献[19-23]提出基于阻抗匹配的 CT 取能方法,即在 CT 副边并联电容以实现无功补偿,相比于同等条件下的传统 CT 取能装置,该方法能有效提升低电流时的输出功率,但由于未对取能 CT 参数进行全局优化,使得装置的启动电流仍然较高,无法实现阻抗匹配条件下的最优功率输出。

为此,本文首先分析了副边补偿谐振式 CT 取能装置的工作机理,然后采用第二代遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)构建了综合质量-互感-损耗数学优化模型,对采用谐振式 CT 取能装置的磁芯参数进行全局优化设计,进而实现了 CT 取能装置的最优功率输出,最后通过电磁及 MATLAB 仿真和实验对比,验证了理论分析的正确性。

1 谐振式取能 CT 原理分析

谐振式 CT 取能结构如图 1 所示,主要由取能磁芯、副边线圈、补偿电容和控制模块构成。图 1 中 I_p 、 I_s 分别为取能 CT 一次侧、二次侧电流。开气隙磁芯等势位夹接在输电线路,势必会大幅降低磁芯的有效磁导率。为此,本文提出在副边绕组两端配置并联补偿电容 C_r ,利用谐振的原理实现较大功率输出。控制模块的作用是对二次侧加以保护、交直流变换,为负载提供所需电能。

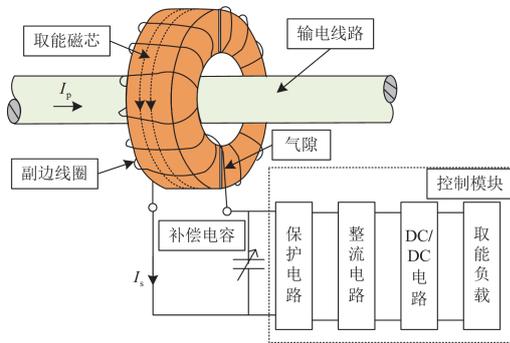


图 1 谐振式 CT 取能结构

Fig. 1 Resonant CT energy harvesting structure

取能 CT 基于电磁感应通过磁场捕获交变电能,其电路可等效为变压器互感模型,如图 2 所示。

输电线路可看作匝数为 1 的原边线圈,副边线圈接收能量后向负载供电,原边与副边线圈之间的互感是 CT 取能的关键。其中,输电线路上的电流可视作恒流源, I_p/I_s 、 L_p/L_s 、 r_p/r_s 分别为原边/副边线圈的电流、自感和内阻, $D_1—D_4$ 为副边整流二极管, C_r 为滤波电容, R_L 为负载(由要求的额定功率和输出电压决定), M 为系统互感。其中,当分析功率传输时, r_p/r_s 反映功率损耗,可忽略。

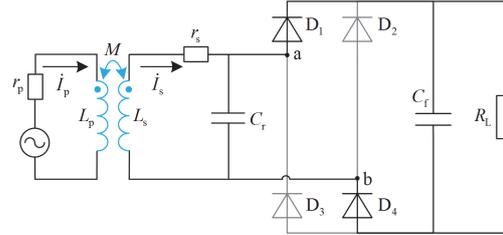


图 2 取能系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the energy harvesting system

副边整流滤波及负载可等效成阻性负载 R_e 。

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

则取能 CT 副边折算到原边的反映阻抗 Z_p 可表示为

$$Z_p = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} = \frac{\omega^2 M^2 (1 + j\omega C_r R_e)}{j\omega L_s + R_e - \omega^2 L_s C_r R_e} \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为取能装置的角频率; Z_s 为采用谐振补偿结构的副边阻抗。

进而,对反映阻抗 Z_p 进行实虚部分解可得

$$\begin{cases} R_Z = \frac{\omega^2 M^2 R_e}{R^2 (\omega^2 C_r L_s - 1)^2 + \omega^2 L_s^2} \\ X_Z = \frac{-\omega^3 M^2 [R_e C_r (\omega^2 C_r L_s - 1) + L_s]}{R_e^2 (\omega^2 C_r L_s - 1)^2 + \omega^2 L_s^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_Z 、 X_Z 分别为反映阻抗 Z_p 的实部和虚部。

由上述分析可得从一次侧端口看进去的简化等效电路,如图 3 所示。

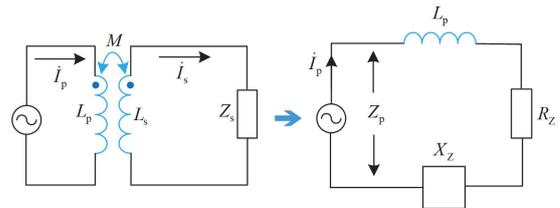


图 3 简化的取能系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the simplified energy harvesting system

进而可得等效一次侧阻抗 Z_p 为

$$Z_p = R_z + j(\omega L_p + X_z) \quad (4)$$

上述中 L_s 、 L_p 、 R_c 、 ω 的值在一定条件下可知。此时, 对补偿电容 C_r 进行调节, 可以改变一次侧等效阻抗 Z_p 。显然, 当 C_r 满足 $X_z = 0$ 时, 取能系统处在工作频率谐振点。

$$C_r = \frac{(2L_p L_s - M^2)}{2\omega^2 L_s (L_p L_s - M^2)} - \frac{\sqrt{M^4 \omega^4 R_c^4 - 4\omega^6 L_s^2 (M^2 - L_p L_s)^2 R_c^2}}{2\omega^4 L_s (L_p L_s - M^2) R_c^2} \quad (5)$$

同时给出负载吸收的有功功率 P_N 为

$$P_N = \frac{I_p^2 M^2 \omega^2 R_c}{R_c^2 (\omega^2 C_r L_s - 1)^2 + \omega^2 L_s} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当输电线路电流 I_p 一定时, 负载吸收的有功功率 P_N 与互感 M , 副边自感 L_s 与阻性负载 R_c 相关, 显然通过提高 M 、 R_c 和降低 L_s 均可提高 P_N 。下文将通过磁芯参数优化设计来提高互感 M , 同时对取能 CT 质量和损耗影响因素展开分析, 旨在提高取能 CT 的功率密度。

2 高功率密度取能 CT 优化设计

2.1 取能 CT 互感分析

取能 CT 原、副边能量传输形式不同于传统螺线管变压器, 因此需要对通过取能磁芯的磁通进行推导。图 4 为取能磁芯截面图。 D 、 d 、 h 分别为磁芯的外、内径和高度; S 为端口处横截面积; δ 为两侧气隙长度之和。

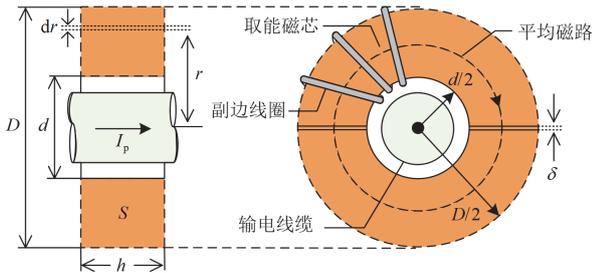


图 4 取能磁芯截面图

Fig. 4 Cross-section of the energy harvesting core

距离输电导线中心 r 处, 宽度为 dr 的磁芯截面中穿过的磁通为 $d\Phi$, 对 $d\Phi$ 进行内外半径范围积分可得磁通 Φ 为

$$\Phi = \int_{d/2}^{D/2} B h dr = \int_{d/2}^{D/2} \frac{\mu_0 \mu_r I_p h}{2\pi r + \delta(\mu_r - 1)} dr = \frac{\mu_0 \mu_r I_p h}{2\pi} \ln \left(\frac{\pi D + \delta(\mu_r - 1)}{\pi d + \delta(\mu_r - 1)} \right) \quad (7)$$

式中: μ_0 、 μ_r 分别为真空磁导率和磁芯的相对磁导率; B 为磁感应强度。磁通 Φ 穿过 N 匝线圈, 与线圈相连的磁链为 Ψ , 当磁链发生变化时, 原、副边感生互感为

$$M = \frac{\Psi}{I_p} = \frac{\mu_0 \mu_r h N}{2\pi} \ln \left(\frac{\pi D + \delta(\mu_r - 1)}{\pi d + \delta(\mu_r - 1)} \right) \quad (8)$$

式(8)表明, 互感 M 与磁芯的相对磁导率 μ_r 、高度 h 、绕组匝数 N 成正比, 但匝数的增加会导致绕组自感增大, 从而降低了功率输出能力, 而当磁芯外内、径 D 、 d 之比较大时, 才能取得较高互感。可见当磁芯材质一定时, 可定量对互感展开分析, 式(8)对取能磁芯的互感优化具有指导作用。

2.2 取能 CT 质量及损耗分析

如图 4 所示, 感应取电装置磁芯的质量 G 包括磁芯质量 G_r 和线圈质量 G_l 两部分, 磁芯质量主要受磁芯尺寸与材质决定, 线圈则为铜导线, 由线径与导线长度决定, 如式(9)所示。

$$G = G_r + G_l = \rho_{\text{core}} h \left[\pi \left(\frac{D^2 - d^2}{4} \right) - \delta(D - d) \right] + L A_s \rho_{\text{cu}} \quad (9)$$

式中: ρ_{core} 为磁芯材质密度; L 为导线长度; A_s 为导线横截面积; ρ_{cu} 为铜的密度。

取能 CT 损耗主要包括磁芯及绕组损耗, 可根据 Steinmetz 经验方程计算磁芯损耗 P_{core} 。绕组损耗 P_{coil} 主要是副边电流 I_s 流经线圈内阻的损耗。若忽略交流效应, 取能 CT 总损耗 P_{loss} 可表示为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{core}} + P_{\text{coil}} = K_m f^\alpha B_m^\beta V_{\text{core}} + I_s^2 r_0 (1 + \gamma(T - T_0)) \quad (10)$$

式中: K_m 、 α 、 β 分别为通过实验数据拟合得到的系数; f 为工作频率; V_{core} 为磁芯体积; B_m 为区域内磁芯感应强度的最大值; r_0 为常温下铜导线内阻, 与导线长度与横截面积有关; γ 为铜温度补偿系数, 一般可取 0.003 93; T 和 T_0 分别为实际工作温度与参考温度。

2.3 取能 CT 参数优化

从式(8)一式(10)可知, 取能装置互感 M 、质量 G 、磁芯损耗 P_{core} 和绕组损耗 P_{coil} 与取能磁芯结构参数相关。首先, 线圈匝数增加会提高互感但会降低带载能力。其次, 由式(8)可知, 当磁芯外径和高度增大时, 互感增大, 但同时装置质量也会相应增加。再者, 磁芯体积增大会导致磁滞损耗增多; 绕组损耗也随导线长度的增加而增大, 这也与高功率密度设计要求相悖。针对目标函数之间存在的冲突问题, 本文采用带有精英策略的第二代遗传算法予

以解决。

根据取能 CT 装置的互感计算模型和损耗、质量计算模型,取能 CT 装置优化设计目标如下所述。

目标函数 $f_1(x)$:取能 CT 原副边之间互感 M 最大,实现功率取值最大。

$$\max f_1(x) = \max \{M\} \rightarrow \max \{P_N\} \quad (11)$$

目标函数 $f_2(x)$:取能 CT 的磁芯损耗、绕组损耗最小,实现效率最大化。

$$\min f_2(x) = \min P_{\text{loss}} \rightarrow \max \left\{ 1 - \frac{P_{\text{loss}}}{P_N} \right\} \quad (12)$$

目标函数 $f_3(x)$:取能 CT 装置质量最小,实现功率密度最大。

$$\min f_3(x) = \min \{G\} \rightarrow \max \left\{ \frac{P_N}{G_T + G_I} \right\} \quad (13)$$

取能 CT 目标函数的约束条件有 3 个。

1) CT 装置机械尺寸约束。图 5 给出了磁芯外径 D 和磁芯高度 h 对互感 M 和磁芯质量 G 的影响,可见互感 M 随机械尺寸的增大而增大,但考虑到相间绝缘与输电电缆承重规范,应约束其尺寸大小。

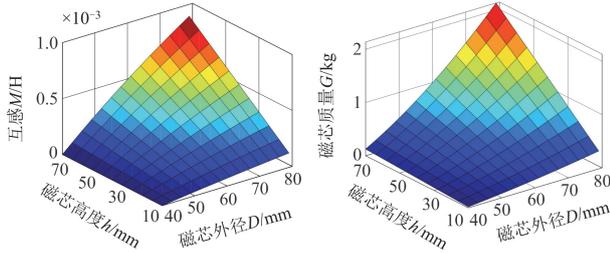


图 5 磁芯尺寸对互感系数和磁芯质量的影响

Fig. 5 Influence of magnetic core dimensions on mutual inductance and core quality

2) CT 取能磁芯饱和约束。铁磁材料磁通密度不应超过材料最大磁感应强度 $B_{m-\max}$ 。

3) 谐振电容值参数约束。补偿电容值过大会占据取能空间。由式(5)可知,减小谐振电容可通过增多线圈匝数 N 来实现。

因此本文选取的约束条件为

$$\begin{cases} \text{s.t. } f_1(x), f_2(x), f_3(x) > 0 \\ d \leq D \leq D_{\max}, 0 < h \leq h_{\max} \\ 0 \leq B_m = \frac{\mu_0 \mu_r I_p}{2\pi r} \leq B_{m-\max} \\ 0 < C_r \leq C_{r-\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: D_{\max} 、 h_{\max} 、 $B_{m-\max}$ 、 $C_{r-\max}$ 为各自约束量的上界。

变压器磁芯选取抗饱和能力较强的无取向硅钢

片,且认为其相对磁导率为恒定。由于取能 CT 装置副边电流较小,因此可近似为原边电流与匝数比值。设磁芯外径 D 、高度 h 以及副边匝数 N 为优化变量,最终确定取能 CT 性能指标和参数设置如表 1 所示。

表 1 取能 CT 性能指标和参数设置

Table 1 Energy harvesting CT performance indicators and parameter settings

类型	参数	数值
取能 CT 设计指标(磁芯型号: 首钢 23SQG090)	μ_r	2000
	$B_{m-\max}/T$	1.7
	U_{out}/V	25
	I_p/A	15
	f/Hz	45~60
	G/kg	<1.6
	$C_{r-\max}/\mu F$	100
	工作温度/ $^{\circ}C$	-20~55
固定参数	δ/mm	0.1
	d/mm	40
优化参数	磁芯外径 D	—
	绕组匝数 N	—
	磁芯高度 h	—

图 6 为 Pareto Front 最优解集的分布情况。由最优解集可知,冲突性多目标优化存在多解,应根据实际问题考虑优化目标的权重占比。为决策最优结果,对最优解集中的解先进行规范化排序,如式(15)所示。

$$f_i = \sum_{n=1}^{n_{\text{obj}}} \left(\frac{f_i(n) - f_{\min}(n)}{f_{\max}(n) - f_{\min}(n)} \right) \cdot w_i \quad (15)$$

式中: n_{obj} 为优化目标个数; f_i 为根据表达式得出的解集中第 i 个解的规范值; $f_i(n)$ 为 Pareto 解集中第 i 个解对应的第 n 个优化目标的值; $f_{\max}(n)$ 、 $f_{\min}(n)$ 分别为所有解中第 n 个优化目标的最大、最小值; w_i 为不同目标函数的权重。

结合实际工程需求,均分目标权重。得到图 6 中最佳决策点 C_1 对应的最优设计工况参数解集为: $(D, h, N) = (0.0694, 0.0603, 114.2)$, 近似取 $D = 69 \text{ mm}$, $h = 60 \text{ mm}$, $N = 114$ 匝。

3 仿真实验

本文基于有限元 COMSOL 仿真平台对前述优化理论进行仿真验证,材料上选取抗饱和能力较强的无取向硅钢片,单侧气隙长度设为 0.05 mm ,绕组匝数 N 为 114 匝,在控制气隙、材料、质量等影响参数一致的前提下,选取对比磁芯 B 和优化磁芯

A 进行分析对比, 近似修正优化磁芯 A 与对比磁芯 B 的仿真参数如表 2 所示。

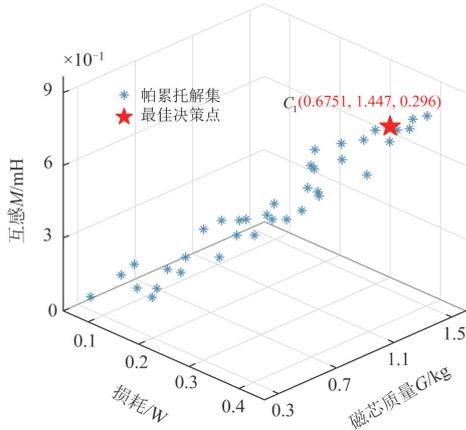


图 6 Pareto Front 最优解集分布

Fig. 6 Distribution of the Pareto Front optimal solution set

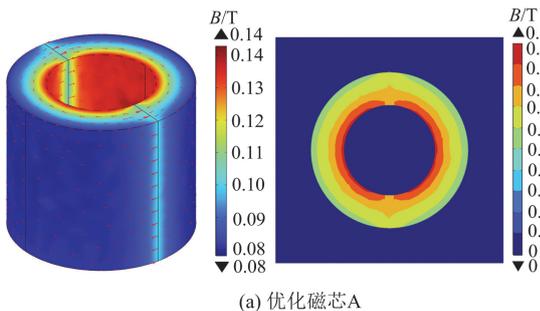
表 2 两种磁芯仿真参数

Table 2 Two types of magnetic core simulation parameters

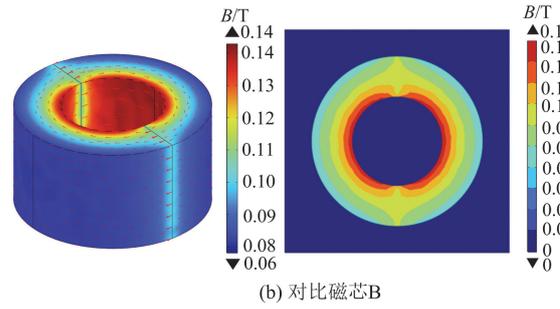
参数	磁芯 A	磁芯 B
相对磁导率 μ_r		2000
磁芯内径 d/mm		40
总气隙 δ/mm		0.1
磁芯外径 D/mm	69	76
磁芯高度 h/mm	60	45
体积 $V_{\text{core}}/\text{m}^3$	1.487×10^{-4}	1.474×10^{-4}
重量 G/kg	1.433	1.384

通入 15 A 工频交流电, 根据表 2 磁芯参数可得磁芯 A、B 的磁场强度分布与变化云图如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 磁芯 A、B 均在磁芯近输电导线侧取得最大磁场密度, 且基本一致。但磁芯 B 外边缘处磁场强度为 0.06 T, 低于磁芯 A 外边缘磁场强度 0.08 T。构建磁芯内部磁场强度随水平距离变化趋势如图 8 所示, 通过对数据进行函数拟合可知磁芯 B 的平均磁场强度(average flux density, AFD)为 0.097 T, 磁芯 A 外边缘处磁场强度为 0.105 T, 较磁芯 B 提高了 8.3%。



(a) 优化磁芯 A



(b) 对比磁芯 B

图 7 磁芯磁场强度分布与变化云图

Fig. 7 Magnetic field intensity distribution and variation cloud map of the magnetic core

进一步, 计算出磁芯 A、B 的互感分别为 6.94×10^{-4} H 和 5.97×10^{-4} H, 互感提升了 16.2%, 这与由式(8)计算得出的互感基本相同, 验证了理论分析的正确性。

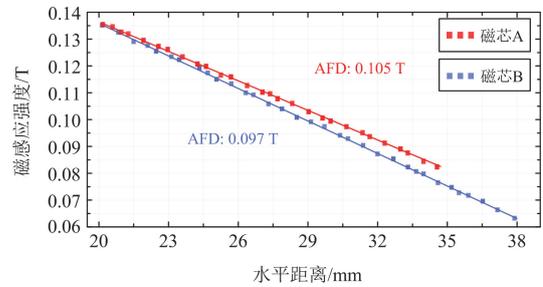
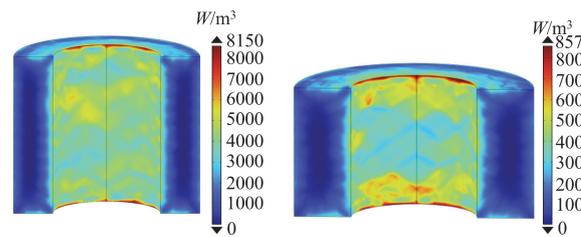


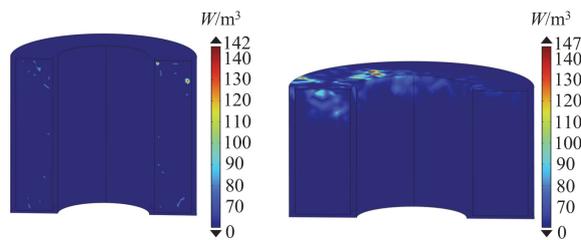
图 8 截面磁感应强度随水平距离变化线图

Fig. 8 Line diagram of sectional magnetic induction intensity changing with horizontal distance

图 9 为磁芯 A、B 的磁芯损耗密度和绕组损耗密度分布情况。由图 9(a)可知, 取能磁芯的损耗密



(a) 磁芯 A、B 的磁芯损耗密度剖面对比图



(b) 磁芯 A、B 的绕组损耗密度剖面对比图

图 9 磁芯 A、B 损耗密度剖面图

Fig. 9 Cross-sectional diagram of loss density in cores A and B

度分布与磁场强度分布特性相同，近输电导线侧损耗密度最大，磁芯边缘处损耗密度最小，同等取能效果下优化后的磁芯 A 的平均磁芯损耗密度低于磁芯 B。由图 9(b)可以看出，磁芯 B 的局部绕组损耗较高，但整体与磁芯 A 差别不大，主要是由于导线内阻较低且原边电流较小，该环境下装置损耗主要来源于磁芯损耗。

基于前述的优化分析，本文通过 MATLAB 仿真平台搭建取能电路模型验证谐振式取能 CT 方法的有效性，如图 10 所示。由表 2 的优化磁芯 A 参数可计算出对应的原副边互感及绕组自感，由原边匝数与磁链守恒的关系可得原边自感。而针对本文系统，额定功率为 2 W，为了满足后级 DC/DC 变换需求，所以要求二次侧经不控整流后输出电压约为 25 V，此时根据式(1)可知 R_c 约为 380 Ω 。

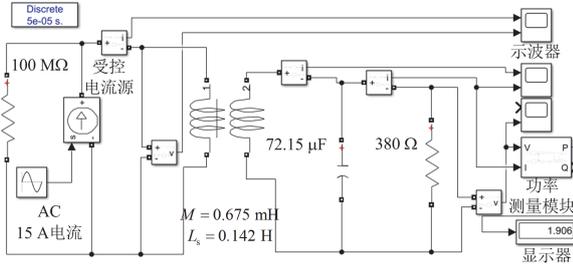


图 10 谐振式 CT 取能仿真模型

Fig. 10 Simulation model of resonant CT energy harvesting

当输入工频 15 A 低电流时，图 10 显示器中显示输出功率的大小为 1.906 W，根据式(6)可以计算出理论负载功率为 1.911 W，仿真与理论计算结果基本保持一致。图 11 为谐振支路电流与负载电流电压仿真波形。由图 11 可知，谐振支路电流 I_c 幅值为 0.87 A，为负载电流 I_2 幅值 0.102 A 的 8.5 倍，由过电流谐振原理可知

$$I_c = QI_2 = R_c \omega C_r I_2 \quad (16)$$

由图 10 中参数计算理论上并联谐振的品质因数 Q 为 8.6，与仿真结果中品质因数 ($Q = 8.5$) 相差很小，说明此时谐振效果较好。

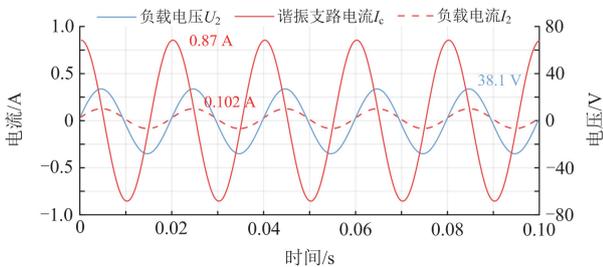


图 11 谐振支路电流与负载电流电压波形

Fig. 11 Current and voltage waveforms of resonant branch and load

为进一步对比优化参数对谐振取能方法的功率增益效果，将对磁芯 B 的磁芯参数代入到仿真电路，在并联补偿电容 $C_r = 77.5 \mu F$ 的情况下，Power 模块显示功率为 1.76 W。相较于常规谐振取能方法^[24]，基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法可进一步提升取能功率，从而有效解决高压监测设备小电流供能死区问题，从而保证输电线路在线监测设备能够获取不间断电源。

4 实验验证

为验证上述理论分析和仿真结果的准确性，基于上述第二代遗传算法设计出表 2 中优化磁芯 A 的参数，选取首钢 23SQG090 规格硅钢片制作开气隙磁芯。为保证实验结果的准确性，首先通过 LCR 测试仪进行开路短接实验测得：原边线圈自感 $L_p = 5.1 \mu H$ ，副边线圈自感 $L_s = 0.147 H$ ，互感 $M = 0.731 mH$ 。原副边自互感的数值与理论分析较为接近，存在误差的原因在于其参数受等效磁导率影响较大，而气隙长度无法严格控制为 0.1 mm 所致。

4.1 谐振式 CT 取能输出功率实验

为验证谐振式 CT 取能方法对功率的提升作用，搭建了如图 12 所示谐振式 CT 取能实验平台。将上述测量数据代入式(5)可计算副边补偿电容 C_r 为 69.3 μF 。为降低电容自身的寄生参数对谐振效果的影响，选用多个 10 μF 和 4.7 μF 的无极性聚丙烯电容并联，并接入量程为 500 Ω 的磁盘可调电阻器。同时，采用 FCG-500/6 数字大电流发生器模拟 50 Hz 输电线路电流和横河 WT1800 型功率分析仪测量负载功率。

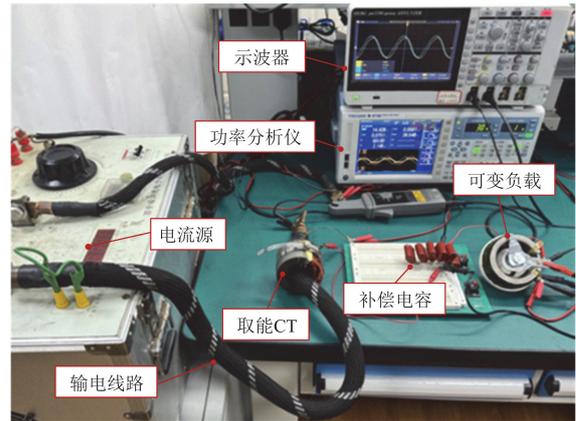


图 12 谐振式取能 CT 实验平台

Fig. 12 Experimental platform for resonant CT energy harvesting

图 13 展示了输电线路电流为 15 A，负载阻值为 380 Ω 时，功率分析仪的实验测量数据。 I_{rms1} 为

输电线路电流; I_{rms2} 为谐振支路电流; U_{rms3} 、 I_{rms3} 分别为负载的电压和电流。为了便于观察, 将负载电流波形放大 5 倍。从实验数据可以看出, 输电线路电流为 15 A 时, 负载功率 P_3 为 2.186 W, 根据所测得的实际原副边自互感数据, 代入式(6)计算得到理论功率为 2.02 W, 两者基本吻合, 验证了谐振式 CT 取能方法的正确性。

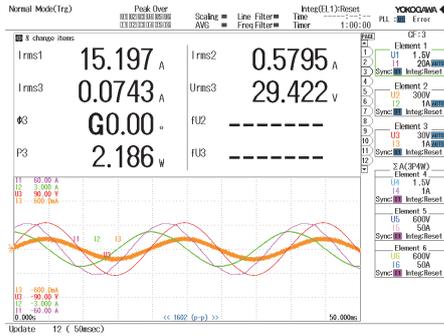


图 13 15 A 电流下谐振式取能 CT 实验波形

Fig. 13 Experimental waveforms of resonant CT energy harvesting at 15 A current

同时, 实验中测得 I_{rms2} 与 I_{rms3} 比值为 7.8, 与前述所测数据计算出的谐振品质因数 ($Q=8.2$) 基本一致, 可知此时系统达到谐振状态。

4.2 补偿电容对比实验

考虑到电网频率的波动性会使得所需匹配电容大小发生改变, 因此进行多组补偿电容对比实验如图 14 所示, 当补偿电容为 69 μF 时, 谐振支路与负载支路电流的比值为 7.8, 当补偿电容值偏差在 5 μF 内时, 负载的功率下降不明显, 这是由于设计参数的品质因数偏小, 能够适应电网频率的小范围波动。而当电容值偏差大于 5 μF 时, 功率急剧下降, 且谐振支路与负载支路电流的比值也与品质因数相差巨大, 这也进一步验证了文中仿真的正确性。

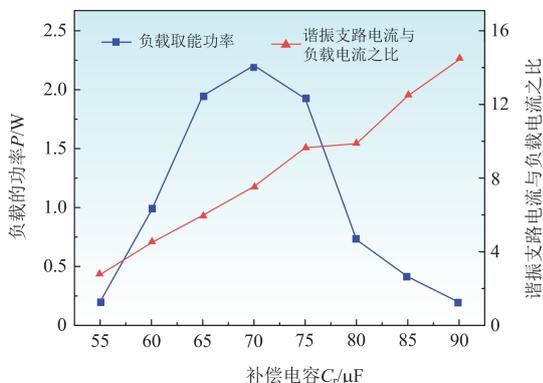


图 14 补偿电容对比实验

Fig. 14 Comparison experiment of compensation capacitors

4.3 传统取能与谐振取能对比实验

为验证基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法在不同输电线路电流、负载阻值下的取能效果, 通过模拟电流发生器输入 10~80 A 的 50 Hz 交流电流, 在 (300, 500) Ω 范围内逐一改变负载大小并记录对应的取能功率如图 15 所示。

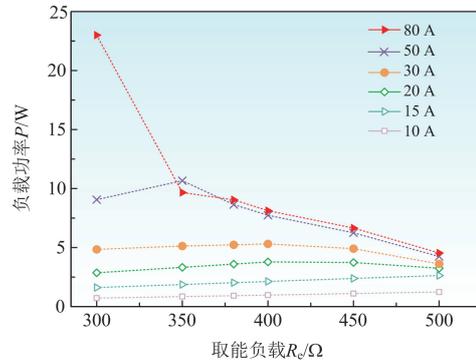


图 15 谐振式 CT 取能实验数据

Fig. 15 Experimental data of resonant CT energy harvesting

由图 15 可知, 当输电线路通入 10 A、15 A 的低电流时, 谐振状态几乎不受影响, 此时负载功率的大小与负载阻值呈正相关, 在 500 Ω 时取得最大功率。但是当输电线路电流增大至 30 A 及以上时, 功率曲线呈现明显的非线性关系, 且随着电流的增大, 最大功率点对应的阻值也在逐渐减小。经分析, 是由于电路发生谐振导致实际流经副边线圈的电流倍增, 输电线路上的大电流使取能磁芯加快接近饱和状态, 相对磁导率发生改变使得电路失谐, 则负载功率不会有明显的增加。当减小负载阻抗时, 可有效抑制波形畸变, 故会出现最大功率点且对应的负载电阻不断降低的情况。由于仿真模型中的互感变压器并不会出现磁芯饱和现象, 所以仿真数据中取能功率随负载 R_e 增加而线性增大, 而在实验中取能磁芯在大电流、大负载情况下更容易接近饱和状态, 故会呈现功率曲线的非线性特性, 这也验证了前文关于输出功率影响因素分析的正确性。

图 16 为采用传统非谐振式取能 CT 的实验数据, 传统非谐振取能方法在 (300, 500) Ω 区间内因带载过大输出功率极小, 所以选定实验阻值范围为 (10, 100) Ω 。可见, 传统非谐振式取能 CT 功率输出明显低于谐振式 CT 取能方法, 15 A 时取得的最大功率为 0.357 W。当电流增大至 80 A 时, 与前文分析相同, 此时取能磁芯接近饱和, 最大功率点向较小阻值发生偏移。

同时为了能更加直观地对比基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法的有效性, 图 17 为两种磁芯和取能方法在 0~500 Ω 之间的最大输出功率对比曲线。

可以看出在取能方法上,采用谐振式 CT 取能方法相较于传统非谐振式 CT 取能方法提升功率显著,在输电线路低电流时约是传统非谐振式 CT 取能方法的 6 倍。当电流增大至 50 A 及以上时磁芯接近饱和区,采用谐振式 CT 取能方法相较于传统非谐振式 CT 取能方法有效提升功率 2 倍以上。而在两种取能方法下,基于优化磁芯的 CT 取能方法较于对比磁芯 CT 取能方法的功率增量约为 10%,功率密度进一步提升。上述说明基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法在提高电路输出功率上具有明显的优越性。

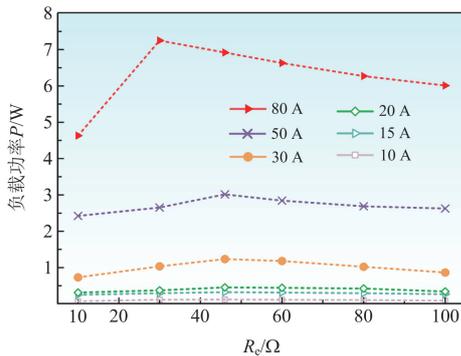


图 16 传统非谐振式取能 CT 实验数据

Fig. 16 Experimental data of traditional non-resonant CT energy harvesting

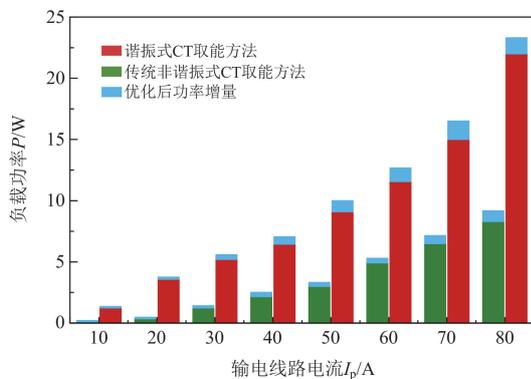


图 17 两种磁芯和取能方法的最大输出功率对比曲线

Fig. 17 Comparison curves of maximum output power between two types of magnetic cores and energy harvesting methods

5 结论

本文采用了一种基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法,以解决传统 CT 取能方法在低电流时无法实现输电线路在线监测设备实时供电问题,得到以下结论。

- 1) 利用 NSGA-II 优化算法可使取能 CT 互感值提升约 16.2%,且磁芯损耗更小。
- 2) 采用基于优化磁芯的谐振式 CT 取能方法,

可极大提高系统输出功率及功率密度,在输电线路低电流工作状态下,可将功率提升至 2.186 W,功率密度约为传统 CT 取能方法的 6 倍。

后续将不断完善优化算法以进一步提高功率密度等级,同时针对输电线路大电流工况下取能 CT 抗饱和问题展开深入研究。

参考文献

- [1] 陈杰,刘牧阳,邓小宇,等.基于离散信息模型的电力系统汇集点惯量在线监测方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):44-52.
CHEN Jie, LIU Muyang, DENG Xiaoyu, et al. Online monitoring method of power system convergence point inertia based on discrete information modelling[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 44-52.
- [2] 王雷,楚明月,王晓华,等.基于随机森林的智能变电站一次侧设备运行状态监测方法研究[J].电测与仪表,2024,61(7):184-190.
WANG Lei, CHU Mingyue, WANG Xiaohua, et al. Research on monitoring method of primary equipment operation state in intelligent substation based on random forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 184-190.
- [3] 高思航,冯少轩,刘咏熙,等.基于摩擦纳米发电机的输电线路振动能量收集装置[J].电力工程技术,2024,43(5):208-215.
GAO Sihang, FENG Shaoxuan, LIU Yongxi, et al. Vibration energy harvesting device of transmission line based on triboelectric nanogenerator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 208-215.
- [4] YI Zhenxiao, CHEN Zhaoliang, YIN Kai, et al. Sensing as the key to the safety and sustainability of new energy storage devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 431-452.
- [5] 张焕龙,齐企业,张杰,等.基于改进YOLOv5的输电线路鸟巢检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(2):151-159.
ZHANG Huanlong, QI Qiye, ZHANG Jie, et al. Bird nest detection method for transmission lines based on improved YOLOv5[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 151-159.
- [6] 杨峰,杜林,王云承,等.智能传感器热电及磁场能量收集方法[J].高电压技术,2015,41(12):3909-3915.
YANG Feng, DU Lin, WANG Yuncheng, et al. Thermoelectric and magnetic energy harvesting methods for intelligent sensors[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3909-3915.
- [7] 胡江华.应用于输电线路在线监测设备的太阳能电源设计与研究[D].广州:华南理工大学,2017.
HU Jianghua. Design and research of solar power supply for online monitoring equipment of transmission lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [8] 张秋雁,李红斌,程含渺,等.有源电子式电流互感器在线监测技术研究[J].高电压技术,2016,42(1):208-213.
ZHANG Qiuyan, LI Hongbin, CHENG Hanmiao, et al. Research on online monitoring technology for active electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering,

- 2016, 42(1): 208-213.
- [9] 高思航, 刘咏熙, 王锐, 等. 基于摩擦纳米发电机的输电线路微风振动自驱动传感技术[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 188-197.
GAO Sihang, LIU Yongxi, WANG Rui, et al. Self-powered sensing technology of wind vibration for transmission lines based on triboelectric nanogenerator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 188-197.
- [10] 程钰, 曾翔君, 马朝瑜, 等. 一种用于输电线路视频监测的取能电源的设计[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 156-163, 170.
CHENG Yu, ZENG Xiangjun, MA Zhaoyu, et al. Design of an energy extraction power supply for video monitoring of transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 156-163, 170.
- [11] 刘宏伟, 郑遵国, 李玉付, 等. 一种基于交流电场感应的取能电源设计[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 214-222.
LIU Hongwei, ZHENG Zunguo, LI Yufu, et al. Optimal design of energy harvesting power supply based on AC electric field induction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 214-222.
- [12] 柳百毅, 陈为, 李榜, 等. 基于感应取能的微功率能量收集器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1474-1485.
LIU Baiyi, CHEN Wei, LI Bang, et al. Micro-power energy harvester based on electromagnetic induction[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1474-1485.
- [13] 徐文浩, 徐启峰, 谢楠. 基于四电平编码与弱光通信的极低功耗传光式电流互感器[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 148-157.
XU Wenhao, XU Qifeng, XIE Nan. An optical-type current transformer with extremely low power consumption based on four-level encoding and weak optical communication[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 148-157.
- [14] 刘亚东, 盛戈皞, 王又佳, 等. 基于功率控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 70-74.
LIU Yadong, SHENG Gehao, WANG Youjia, et al. Current transformer draw-out power supply design based on power-controlled method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 70-74.
- [15] 王黎明, 张中浩, 周军, 等. 宽范围 TA 取电电源[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 899-906.
WANG Liming, ZHANG Zhonghao, ZHOU Jun, et al. Wide range online TA drawout power[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 899-906.
- [16] 郭琳云, 尹项根, 严新荣, 等. 配电网智能设备自取电电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 217-221.
GUO Linyun, YIN Xiangen, YAN Xinrong, et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 217-221.
- [17] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71, 76.
REN Xiaodong, CHEN Shuyong, JIANG Tao. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71, 76.
- [18] 王黎明, 李海东, 陈昌龙, 等. 新型高压输电线路下限死区大功率在线取能装置[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 344-352.
WANG Liming, LI Haidong, CHEN Changlong, et al. A novel online energy extracting device with low lower limit deadband on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 344-352.
- [19] 詹坤, 高广德, 陈亚龙, 等. 基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 74-83.
ZHAN Kun, GAO Guangde, CHEN Yalong, et al. Online stabilization of transmission line energy extraction based on adaptive adjustment of auxiliary core impedance[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 74-83.
- [20] 马渊, 刘宗伟, 许春雨, 等. 基于并联谐振的电流互感器在线取电方法[J]. 电力电子技术, 2024, 58(8): 26-29, 39.
MA Yuan, LIU Zongwei, XU Chunyu, et al. Current transformer on-line power taking method based on parallel resonance[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(8): 26-29, 39.
- [21] 王旭红, 胡劫睿, 樊绍胜, 等. 采用双磁路的电流互感器在线取电方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 187-199.
WANG Xuhong, HU Jierui, FAN Shaosheng, et al. On-line power acquiring method of current transformer with dual magnetic circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 187-199.
- [22] 刘铮, 樊绍胜, 胡劫睿. 基于阻抗匹配的输电线路在线取电方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6867-6876, 7100.
LIU Zheng, FAN Shaosheng, HU Jierui. Research on online energy harvesting method for transmission lines based on impedance matching[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6867-6876, 7100.
- [23] 王智博. 电流互感器取电电源的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WANG Zhibo. Research and design of current transformer feeding power supply[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [24] 程志远, 隋立程, 宋凯, 等. 谐振补偿式电流互感器取能方法的研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4896-4902.
CHENG Zhiyuan, SUI Licheng, SONG Kai, et al. Resonance compensation current transformer energy extraction[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4896-4902.

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-04-25

作者简介:

程志远(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为无线电能传输及高压输电线路感应取电; E-mail: chengzhiyuan@126.com

李东东(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统建模分析、运行控制和风力发电系统。E-mail: powerlidd@163.com

(编辑 张颖)