

压电发电机 AC-DC 输出性能的优化与仿真研究

金文平,王光庆,展永政

(浙江工商大学 信息与电子工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:交流-直流(AC-DC)转换电路对压电振动发电机的输出性能影响较大,为提高压电发电机 AC-DC 转换电路的输出性能和能量转换效率,该文首先给出了压电振动发电机系统等效电路模型,基于该模型利用力学平衡原理和电路理论推导了发电机稳态运行时 AC-DC 输出电压和输出功率表达式。以输出功率最大化为优化目标,通过微分计算对发电机 AC-DC 转换电路在不同负载电阻下的输出功率进行了优化分析,分别得到了发电机在开路谐振和短路谐振状态下优化的负载电阻、振动位移、输出电压和输出功率。仿真与对比分析了发电机优化后的输出性能,结果表明,优化 AC-DC 转换电路的输出性能可提高压电振动发电机的整体输出性能和能量转换效率。

关键词:压电振动发电机;性能优化;交流-直流(AC-DC)转换电路;仿真分析

中图分类号:TM619

文献标识码:A

The Optimization and Simulation of the AC-DC Output Performances of Piezoelectric Generator

JIN Wenping, WANG Guangqing, ZHAN Yongzheng

(School of Information and Electronic Engineering of Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The AC-DC transferring circuit greatly affects the output performances of the piezoelectric vibration generator (PVG). In order to improve the output performance and the energy conversion efficiency of the PVG, this paper presents the equivalent circuit model of the PVG at first, and then the analytical expressions of the AC-DC circuit, such as the output voltage and the output power, are derived by using the mechanical equilibrium principle and circuit theory when the PVG operates under the steady-state. To maximize the output power of the AC-DC transferring circuit, the optimization of the output power with different resistance loads are carried out by using differential calculation method, and the optimal load resistance, displacement, output voltage and output power are obtained under the open-circuit resonance and short-circuits resonance condition respectively. Some simulations are carried out to analyze the output performances of the PVG. The validity are performed by compared the results with the coupling analysis results of Ottman and the in-phase analysis results of Guyomar. The results have shown that the optimization of the output performance of the AC-DC circuit is attributing to enhance the total performance and the energy conversion efficiency of the PVG.

Key words: piezoelectric vibration generator; performance optimization; AC-DC transferring circuit; simulation analysis

0 引言

随着微小功率电子产品的广泛应用,研究者对小尺寸、低能耗微电子设备的研究产生了兴趣。与其相关的微能源技术也得到了越来越多的关注,许多工作者开展了从太阳能、风能和环境振动能等各种环境中获取电能的研究^[1]。其中,利用压电发电

技术从振动的环境中获取能量被称为 21 世纪的绿色能源,具有广泛的应用前景^[2]。

优化压电发电机的输出性能是提高其能量转换效率的关键技术之一,国内外专家学者对此作了大量的研究工作。Umeda^[3]和 Goldfarb^[4]研究了压电元件在压电常数 d_{31} 和 d_{33} 工作模态时产生电能的效

收稿日期:2013-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277165);浙江省自然科学基金资助项目(Y1080037);浙江省教育厅基金资助项目(Y201223050)

作者简介:金文平(1990-),男,安徽巢湖人,硕士生,主要从事压电发电技术方面的研究。王光庆(1975-),男,江西太和人,副教授,博士,主要从事压电发电、超声波驱动技术方面的研究。

率。Richards^[5]建立了压电发电机能量转换效率的分析式,说明了效率与机电耦合因数和品质因数有关。Roudy^[6]进一步推导了基于振动的压电发电机能量采集效率的一般理论。此外,Lesieture^[7]指出当发电机接入系统中会产生附加的阻尼效应,原因是系统电能的转移。为提高压电发电机的输出性能,很多研究对压电发电机交流输出功率的优化问题进行了探讨,但对系统中 AC-DC 输出功率的优化问题讨论不多。最近,Ottman^[8]和 Guyomar^[9]等首先对这个问题开展了研究,Ottman 提出了振动幅度不受负载影响的无耦合分析模型,Guyomar 提出了外部激励函数和质量块运动速度函数相位相同的同相分析模型。事实上,压电振动发电机的负载一般需稳定的 DC 电压,而发电机本身所产生的输出电压却是交流形式,因此必须通过 AC-DC 电路将交变电压转换成稳定的直流电压。可见,AC-DC 转换电路的输出性能直接影响到压电振动式发电机的能量转换效率。

本文跨越结构设计与电路理论,综合考虑 AC-DC 转换电路的影响,将压电发电机连接到 AC-DC 整流器,建立了压电振动发电机系统的等效模型,推导了发电机稳态运行时的电压和功率输出解析表达式。以输出功率最大为优化目标,分别得到了系统开路谐振和短路谐振状态下优化的负载电阻、振动位移、输出电压和输出功率。仿真分析了优化后压电振动发电机的输出性能,通过与 Ottman 的无耦合分析模型和 Guyomar 的同相分析模型的结果比较验证了本文优化方法的可行性。

1 压电发电机机电模型

图 1 为压电振动发电机系统等效模型。图中, $F(t)$ 为外部施加的力, M 为等效质量块, $u(t)$ 为质量块的位移, K 为等效刚度系数, η 为阻尼系数, Θ 为压电耦合系数, C 为有效电容, V_c 为压电晶片两端的电压; $I(t)$ 为流入 AC-DC 电路的电流; R 为负载电阻; V 为负载电阻两端的电压。

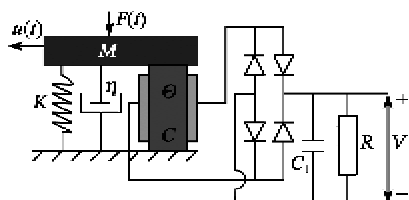


图 1 压电振动发电机系统等效模型

根据力学平衡原理和电路理论,建立系统运动

控制方程^[10-11]:

$$M\ddot{u}(t) + \eta\dot{u}(t) + Ku(t) + \Theta V_c(t) = F(t) \quad (1)$$

$$\Theta\dot{u}(t) - CV_c(t) = I(t) \quad (2)$$

其中

$$I(t) = \begin{cases} C_1 \dot{V}(t) + \frac{V(t)}{R} & (V_c = V) \\ -C_1 \dot{V}(t) - \frac{V(t)}{R} & (V_c = -V) \\ 0 & (|V_c| < V) \end{cases} \quad (3)$$

假设 $F(t) = F_0 \sin \omega t$, 且 $u(t)$ 和 $V_c(t)$ 具有如下形式:

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$V_c(t) = f(\omega t + \theta) \quad (5)$$

$u(t)$ 、 $V_c(t)$ 波形分别如图 2、3 所示, 其中振动响应周期 $T = 2\pi/\omega$, $b - a = T/2$ 。

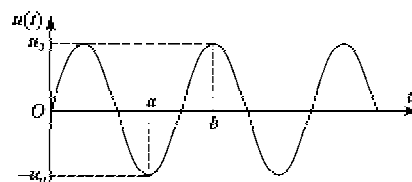


图 2 位移 $u(t)$ 的波形图

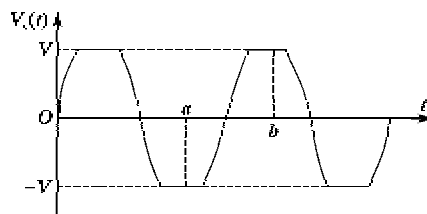


图 3 压电电压 $V_c(t)$ 的波形图

在半个周期 $a \sim b$ 内, 对式(2)积分得

$$V = \frac{4\Theta Ru_0}{4CR + T} \quad (6)$$

则负载平均输出功率:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{16\Theta^2 Ru_0^2}{(4CR + T)^2} \quad (7)$$

式(1)乘以 $\dot{u}(t)$, 式(2)乘以 $V_c(t)$, 在 $a \sim b$ 之间积分, 合并后得

$$\frac{\pi}{2} F_0 u_0 \sin \theta = \frac{\pi}{2} \eta \omega u_0^2 + \frac{T}{2} \frac{V}{R} \quad (8)$$

对式(1)微分, 结合式(2)得

$$M \frac{d}{dt} \ddot{u}(t) + \eta \frac{d}{dt} \dot{u}(t) + \left(K + \frac{\Theta^2}{C} \right) \frac{d}{dt} u(t) - \frac{\Theta}{C} I(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (9)$$

对式(9)在 $a \sim b$ 间积分得

$$\left(K - M\omega^2 + \frac{\Theta^2}{C} \right) u_0 - \frac{T\Theta V}{4CR} = F_0 \cos \theta \quad (10)$$

联合式(8)、(10)可得

$$\left\{ \left(K - M\omega^2 + \frac{\Theta^2}{C} \right) u_0 - \frac{T\Theta V}{4CR} \right\}^2 + \left\{ \gamma\omega u_0 + \frac{2V^2}{\omega R u_0} \right\}^2 = F_0^2 \quad (11)$$

将式(6)代入式(11)可得

$$u_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(\gamma\omega + \alpha)^2 + (K - \omega^2 M + \beta)^2}} \quad (12)$$

式中: $\alpha = \frac{32\Theta^2 R}{\omega(4CR + T)^2}$; $\beta = \frac{4\Theta^2 R}{4CR + T}$ 。

则 AC-DC 输出电压和输出功率分别为

$$V = \frac{4\Theta R F_0}{(4CR + T) \sqrt{(\gamma\omega + \alpha)^2 + (K - \omega^2 M + \beta)^2}} \quad (13)$$

$$P = \frac{16F_0^2 \Theta^2 R}{(4CR + T)^2 [(\gamma\omega + \alpha)^2 + (K - \omega^2 M + \beta)^2]} \quad (14)$$

2 优化输出功率

为优化 AC-DC 转换电路的输出性能,假设系统工作在稳态,对于给定的系统, K 、 M 、 C 、 Θ 、 γ 是常数,假设 F_0 也是定值,则功率是关于 R 和 ω 的函数,对功率关于 R 求偏导,可得到最佳负载 R^{opt} ,使功率最大^[11-13],即

$$\frac{\partial}{\partial R} P(R, \omega) \big|_{F_0, K, M, C, \Theta, \gamma} = 0 \quad (15)$$

2.1 短路谐振情况

此时 $\omega = \omega_{\text{sc}} = \sqrt{K/M}$, 式(14)可简化为

$$P \approx \frac{4RF_0^2 \Theta^2}{\left(2RC\gamma\omega + \gamma\pi + \frac{4R\Theta^2}{RC\omega + \pi} \right)^2 + 4R^2 \Theta^4} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得到短路谐振时最佳负载:

$$R_{\text{sc}}^{\text{opt}} \approx \frac{\pi^2 \gamma}{2\Theta^2 \sqrt{16 + \pi^2}} \quad (17)$$

相应的功率为

$$P_{\text{sc}}^{\text{opt}} \approx \frac{F_0^2}{\gamma[4 + \sqrt{16 + \pi^2}]} \quad (18)$$

2.2 开路谐振情况

此时 $\omega = \omega_{\text{oc}} = \sqrt{\frac{KC + \Theta^2}{MC}}$, 式(14)可简化为

$$P \approx \frac{4RMCF_0^2 \Theta^2 (KC + \Theta^2)}{4[RK\gamma C^2 + RC\gamma\Theta^2 + 2M\Theta^2] + \pi^2 M^2 \Theta^4} \quad (19)$$

将式(19)代入式(15)得到开路谐振时最佳负载:

$$R_{\text{oc}}^{\text{opt}} \approx \frac{M\Theta^2 \sqrt{16 + \pi^2}}{2\gamma C(KC + \Theta^2)} \quad (20)$$

相应的功率为

$$P_{\text{oc}}^{\text{opt}} \approx \frac{F_0^2}{\gamma[4 + \sqrt{16 + \pi^2}]} \quad (21)$$

由式(18)、(21)可知,当角频率 ω 固定,只存在唯一最佳负载,使功率达到最大。在短路谐振和开路谐振时,虽然 ω 和最佳负载不同,但功率最大值相同,这与文献[11]的结论一致。

3 仿真与对比分析

这里将本文的优化仿真结果分别与 Ottman^[8] 的无耦合分析模型结果和 Guyomar^[9] 同相分析模型结果进行比较。为了便于比较分析,对式(12)~(14)进行归一化处理,结果如下:

$$\bar{u}_0 = \frac{u_0}{F_0/K} \quad (22)$$

$$\bar{V} = \frac{V}{F_0/\Theta} \quad (23)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{F_0^2/\sqrt{KM}} \quad (24)$$

仿真中本文所用的机电等效参数 $K=1\,153\text{ N/m}$, $M=0.014\text{ kg}$, $C=4.126 \times 10^{-8}\text{ F}$, $\gamma=0.241$ 。假

设 $x = \frac{2\Theta^2}{C\gamma} \sqrt{\frac{M}{K}}$, 则有如下 3 种情况。

3.1 x 很小时

取 $\Theta=4.13 \times 10^{-4}$, 则 $\omega_{\text{oc}} \approx \omega_{\text{sc}} = 287\text{ rad/s}$, $x \approx 0.12$ 。

图 4、5 为仿真得到的 $\bar{V}$ 和 $\bar{P}$ 。从图 4、5 可看到,3 条曲线基本重合,说明 x 值很小时,3 种方法都能得到很好的优化结果。

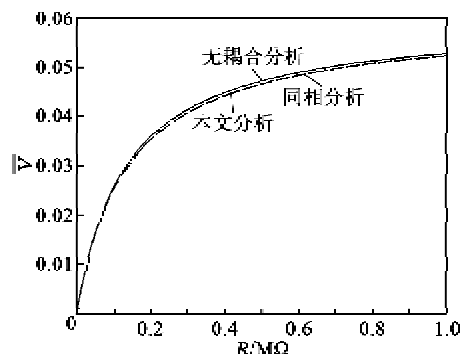


图4 归一化输出电压比较

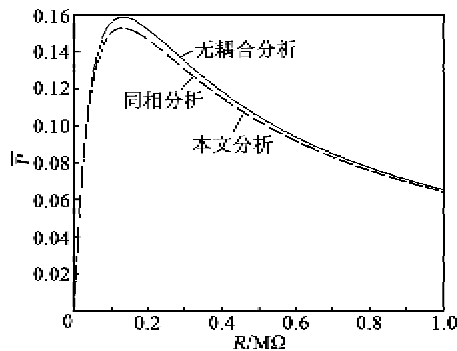
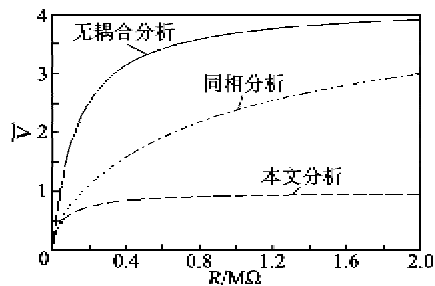


图5 归一化输出功率比较

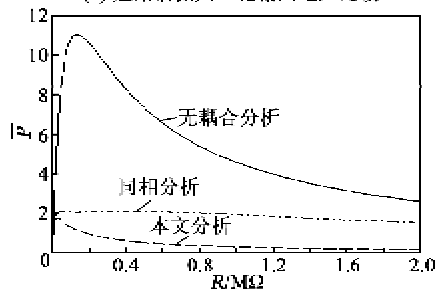
3.2 x 值适中时

取 $\Theta = 3.45 \times 10^{-3}$, 则 $\omega_{sc} = 287 \text{ rad/s}$, $\omega_{oc} = 321 \text{ rad/s}$, $x \approx 8.34$ 。

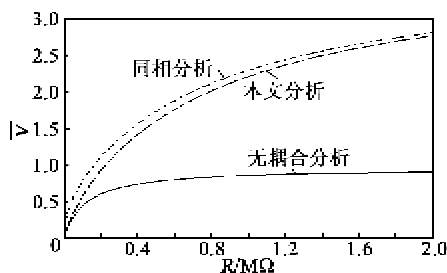
图6为短路谐振时的 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$ 。图7为开路谐振时的 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$ 。从图6、7可看出,与同相分析和本文模型分析相比,无耦合分析的估计值误差较大,因此,当 x 取值中等或更大时,无耦合分析法不适合,这与文献[11]的结果吻合。



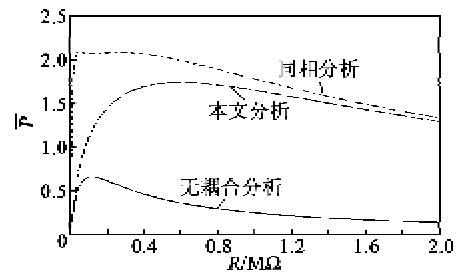
(a) 短路谐振归一化输出电压比较



(b) 短路谐振归一化输出功率

图6 短路谐振时的 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$ 

(a) 开路谐振归一化输出电压



(b) 开路谐振归一化输出功率

图7 开路谐振时的 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$

3.3 x 值较大时

取 $\Theta = 8.97 \times 10^{-3}$, 则 $\omega_{sc} = 287 \text{ rad/s}$, $\omega_{oc} = 471 \text{ rad/s}$, $x \approx 56.39$ 。

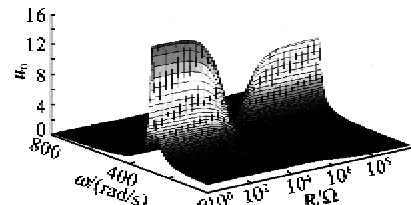
由于当 x 较大时,无耦合分析法不适合。在此,基于同相分析和本文分析,作出了以电阻为横轴,角频率为纵轴的 $\bar{u}_0$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$ 的立体图,分别如图8、9所示。从图8(c)中可看出存在2个点,使输出功率取最大值。即 $R_1 = 3162 \Omega$, $\omega_1 = 292 \text{ rad/s}$, $R_2 = 2238721 \Omega$, $\omega_2 = 460 \text{ rad/s}$ 。

归一化输出功率 $\bar{P}_1 = \bar{P}_2 = 2.08$, 由式(17)计算可得,当 $\omega_{sc} = 287 \text{ rad/s}$ 时,即有

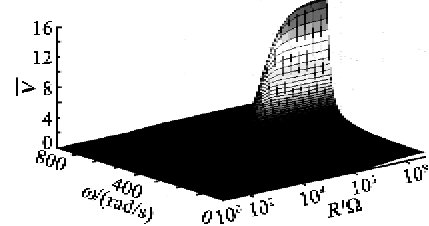
$$R_{sc}^{opt} \approx \frac{\pi^2 \eta}{2\Theta^2 \sqrt{16 + \pi^2}} = 2906(\Omega) \quad (25)$$

由式(19)计算可得,当 $\omega_{oc} = 471 \text{ rad/s}$ 时,则有

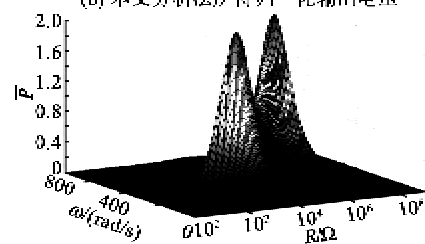
$$R_{oc}^{opt} \approx \frac{M\Theta^2 \sqrt{(16 + \pi^2)}}{2\eta C(KC + \Theta^2)} = 2250189(\Omega) \quad (26)$$



(a) 本文分析法所得归一化振幅



(b) 本文分析法所得归一化输出电压



(c) 本文分析法所得归一化输出功率

图8 本文分析法所得的 $\bar{u}_0$ 、 $\bar{V}$ 、 $\bar{P}$

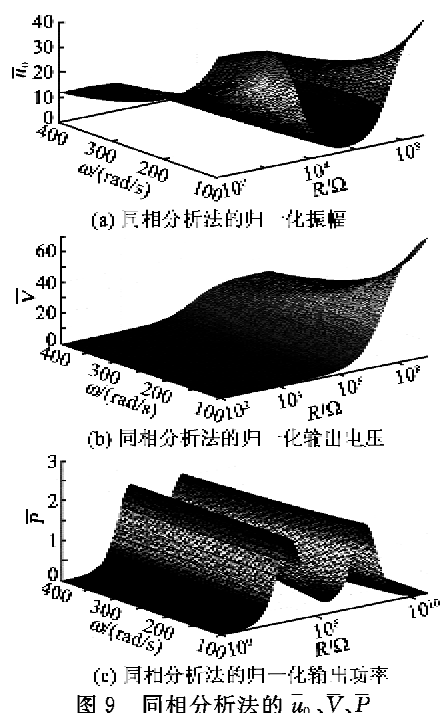


表1为理论和仿真的优化参数对照表,结果验证了本文的理论分析是正确的。

表1 理论与仿真优化参数比较

	短路谐振		开路谐振	
	R/Ω	$\omega/(\text{rad/s})$	R/Ω	$\omega/(\text{rad/s})$
理论结果	2 906	287	2 250 189	471
仿真结果	3 162	292	2 238 721	460

从图9(c)中可看到,同相分析模型中对于每一个工作角频率点都存在2个最佳负载使功率取最大值,即该模型的最大输出功率与角频率无关,这显然不现实。在设计中,我们需选取合适的角频率点以产生最佳的输出性能,同相分析法忽略了这点。

此外,从图8(a)中可看出,振幅在 ω_{sc} 点比在 ω_{oc} 点大,这主要是由于在开路谐振时系统阻尼较大的缘故。因此通过匹配最佳负载使系统工作在开路谐振状态时,可降低振动幅度,减小设备尺寸,节省空间。

从图8(b)中可看出,系统开路谐振时的整流输出电压比短路谐振时的整流输出电压高。这种大电压输出特性可克服整流电桥的最小电压要求,更适用于对大规模器件的供电。另一方面通过仿真还发现,系统工作在短路谐振时的输出电流比开路谐振时的输出电流大,这一特性可应用到电池充电中。提高电池充电效率法是在电池电压不变或变化很慢时,使进入电池的电流最大化。因此,通过匹配最佳

负载使系统工作在短路谐振时,不需要可调的AC-DC转换器就可达到提高电池充电效率的目的。

4 结论

本文建立了压电振动发电机AC-DC转换电路的输出性能表达式,并对其输出功率进行了优化分析,得到了优化的短路负载、开路负载、振幅、电压和输出功率。通过仿真对比分析可得如下结论:

1) 对于机电耦合系数较大的系统,可通过改变匹配最佳负载,使系统工作在短路谐振或开路谐振状态,提高系统的输出功率。

2) 系统短路谐振工作时的电流、小电压输出特性适合应用对电池的充电;通过最佳负载使系统工作在短路谐振时,不需可调的转换器就可达到提高电池充电效率的目的。

3) 系统开路谐振工作时振动振幅小,可减小器件尺寸、节省空间;另外,开路谐振时大电压、小电流的输出特性更适合应用在大规模器件中。

本文下一步的研究工作是建立模型试验系统,通过实验与理论仿真结果的比较,进一步验证本文方法的可行性和正确性。

参考文献:

- [1] 李金田,文玉梅.压电式振动能量采集装置研究进展[J].现代电子技术,2011,34(18):184-187.
LI Jintian, WEN Yumei. A survey on research piezoelectric vibration energy acquisition device[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(18): 184-187.
- [2] 朱莉娅,陈仁文,雷娟.压电振动发电机的研究现状与发展趋势[J].中国机械工程,2011,22(24):3016-3021.
ZHU Liya, CHEN Renwen, LEI Xian. Current status and development trends of vibration-based on piezoelectric generator[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 3016-3021.
- [3] UMEDA M, NAKAMURA K, UEHA S. Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator[J]. J Appl Phys, 1996, 35: 3267-3273.
- [4] GOLDFARB M, JONES L D. On the efficiency of electric power generation with piezoelectric ceramic[J]. ASME, Dyn Syst Meas Control, 1999, 128: 187-193.
- [5] RICHARDS C D, ANDERSON M J, BAHR D F, et al. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component[J]. Micromech Microeng, 2004, 14: 717-721.

(下转第653页)