橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの構造形式と設計に関する検討

竹谷 晃一¹・佐々木 栄一²

¹学生会員 東京工業大学博士課程 土木工学専攻 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 M1-23)

E-mail: takeya.k.aa@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 土木工学専攻 (同上)

E-mail: sasaki.e.ab@m.titech.ac.jp

橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスを提案するとともに、その基本特性について検討した。同調質量系発電デバイスは、従来橋梁の制振のために設置される同調質量ダンパー (TMD) を応用し、ダンパーが吸収する振動エネルギーをもとにEnergy Harvesterとして活用するものである。本研究では、橋梁振動を対象とした同調質量系発電デバイスの有利な装置構成と設計に関する検討を行うため、単質点系と二質点系の同調質量系発電デバイスを提案し、解析を行った。その結果、二質点系は発電装置の減衰比に対する鋭敏性が小さく、蓄電において有利であることを導いた。微変動する橋梁の固有振動数に対しても、二質点系はパラメータ設計によって柔軟に対応できることを示した。

Key Words : bridge vibration, energy harvesting, tuned mass damper (TMD), electromagnetic transducer

1. はじめに

橋梁の損傷を早期に発見するため、ワイヤレスセンサなどを用いたヘルスモニタリングシステムが重要視されているが、システムの長期的な電源供給が課題の1つとなっている。その解決方法として注目されているのが、近年、様々な分野で研究開発が活発に進んでいる環境発電 (Energy Harvesting) である。橋梁振動を利用した環境発電によって、課題となっているモニタリングシステムの電源供給のほか、発電エネルギーをバッテリーへ蓄電することで様々な応用も期待できる¹⁾。

これまで、劣化や騒音の原因である橋梁の振動を制御するため、同調質量ダンパー (Tuned Mass Damper: TMD) や衝撃吸収ダンパー²⁾の設置が検討されているが、その中でTMDに着目すると、TMDのダンパーを発電装置 (Transducer) で置き換えて振動エネルギーを積極的に吸収、電気エネルギーへと変換することで、TMDの吸収エネルギーを利用した環境振動発電が可能となり得る。しかしながら、橋梁の固有振動数は一般に数Hz程度であり、環境振動発電の主な対象である機械振動に比べると非常に低く、発電が困難であった。これまでも実構造物の振動を利用した発電デバイス³⁾⁻⁵⁾が開発されているが、一般的な橋梁に発生する0.1~1mmオーダーの振動振幅に対

して μW ~ mW レベルの発電電力より高い発電性能が求められている。加えて、橋梁の固有振動数は交通状況や気温などによって変化するため、固有振動数変化に対する発電性能を維持できる設計が課題であった。

現状、発電が困難とされる低周波数の振動を対象とした環境振動発電⁶⁾や、発電した電力をワイヤレスセンサに供給できるシステムの開発⁷⁾が試みられているが、これらの取り組みでは、対象としている振動振幅が数十ミリオーダーと橋梁の振動振幅に比べて大きいため、一般的な橋梁に発生する0.1~1mmオーダーの振動振幅に適用することは難しい。低周波数を対象とした環境振動発電の場合、発電による減衰力が高周波数域に比べて小さくなるため、発電と制振の効率は低下する。その解決策の1つは、発電による減衰力が大きい高性能な発電装置を環境振動発電デバイスに適用することである。近年、電磁誘導^{8),9)}や圧電素子¹⁰⁾、エレクトレット^{11), 12)}を用いたものなど様々な発電装置が開発されており、発電効率も向上している。その中でも電磁誘導タイプは発電電力が比較的高く、発電による減衰力が大きいため、高性能な電磁誘導タイプの発電装置を用いることで橋梁の低周波数の振動でも必要な減衰力が得られると考えられる^{13), 14)}。

環境振動発電デバイスの構造形式は多種多様で、同調質量系や片持ち梁型などの環境振動発電デバイスが代表

的である^{15), 16)}。橋梁では、同調質量系を用いた制振装置として先に述べたTMDがあるが、これは質量・ばね・ダンパーの適切な動力学的バランスの下で、振動に対して良好な効果が得られることが知られている。これまでにTMDのモデリングから理論や数値解析、実用算定式など振動制御の最適化手法が数多く提案されている¹⁷⁾⁻²³⁾が、これらのモデリングは、発電を目的とした同調質量系の発電デバイスにそのまま適用することはできない。TMDを環境振動発電に応用した同調質量系の発電デバイスに関して、Tang and Zuo²⁴⁾は単質点と二質点の同調質量系発電デバイスのモデリングを行い、構造形式について比較を行った。その結果、同調質量系発電デバイスに直接調和外力や変位を与える条件下では、減衰比を増加させることで発電電力が増加できる二質点系が有利と結論付けている。しかしながら、橋梁においては外力や変位が発電デバイスに直接作用しないことから、発電電力はある減衰比で極大値を持つと考えられるため、同調質量系発電デバイスの有利な装置構成について詳しく検討する必要がある。

一方、電磁誘導を用いた発電装置の発電による減衰力については、ダッシュポッドでモデリングして環境振動発電の解析を行う方法²⁵⁾があるが、実際には発電装置の力率から生じる電流の位相遅れの影響で減衰力にも位相差が生じるため、発電電力や振動制御特性が異なることが予想される。加えて、発電電力をキャパシタや二次電池に蓄電する場合、発電による減衰比が時々刻々変化するため、減衰比に対する鋭敏性の分析も重要である。

そこで本研究では、橋梁振動を対象とした環境発電デバイス (Energy Harvester) として、TMDのダンパーを電磁誘導型の発電装置に置き換えた同調質量系発電デバイスを考え、単質点と二質点の同調質量系発電デバイスの比較から有利な装置構成について検討し、制振と発電効率の減衰比や橋梁の固有振動数変化に対する鋭敏性、力率による影響など同調質量系発電デバイスの設計に関する特性を明らかにした。

2. 単質点同調質量系発電デバイス

はじめに、図-1に示す単質点系の同調質量系発電デバイス-橋梁に関して解析を行う。すなわち、ばね定数 K のばねと減衰定数 C_M のダンパーで支持された橋梁の等価質量 M があり、等価質量 M には、ばね、電磁誘導型の発電装置および1つの質量で構成された単質点同調質量系発電デバイスが付加されている。質量 M に調和外力 $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ が作用した時、質量 M の変位を $X(t)$ 、単質点同調質量系発電デバイスの質量 m_1 の変位を $x_1(t)$ とする。 m_1 の M に対する質量比 μ_1 は、通常TMDでは約10%

で検討が行われるが、本研究では振動発電と振動制御の両面を考慮しており、デバイスの小型化を考慮して約1%を主なターゲットとして検討を行うこととした。発電装置による減衰力 $F_e(t)$ は発電装置内部の構造と接続した電気回路によって性質が変わるため、発電装置と電気回路も含めて設計する必要がある。

図-2に発電装置の等価回路と抵抗 R を有する同調質量系発電デバイスの電気回路を示す。ファラデーの電磁誘導の法則より、電磁誘導型発電装置の起電力 $E(t)$ は磁界の変化速度 $d\phi/dt$ と発電装置の振動速度 dx/dt に比例すると考えると、起電力と発電装置の振動速度の関係は次のように表せる。

$$E(t) = k_{emf} \frac{d}{dt} \{x_1(t) - X(t)\} \quad (1)$$

k_{emf} は速度に対する起電力の比を表す定数値で、誘導起電力係数[V/s/m]と呼ぶ。図-2のように電磁誘導方式発電装置の等価回路を考えると回路式は次のようになる。

$$E(t) = (R + r)I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (2)$$

発電装置による減衰力 $F_e(t)$ のように表せる。

$$F_e(t) = k_{emf} I(t) \quad (3)$$

電気回路におけるエネルギー損失は内部抵抗 r による消費エネルギーと等しい。ここで、一般性を持たせるため、次の無次元項を導入する。

図-1 単質点同調質量系発電デバイスと橋梁の解析モデル

図-2 電磁誘導型発電装置の等価回路

$$R_r = \frac{R}{r}, \quad L_r = \frac{\omega L}{r}$$

発電装置が吸収したエネルギーと発電したエネルギーの比を変換効率 h と定義すると、次式のように表せる。

$$h = \frac{R_r}{1 + R_r} \quad (4)$$

変換効率 h は回路の抵抗値の比 R_r に依存し、 R_r が大きいほど1に近づく。発電装置の力率 P_f は次のようになる。

$$P_f = \frac{1 + R_r}{\sqrt{L_r^2 + (1 + R_r)^2}} \quad (5)$$

R_r と L_r は変換効率と力率を用いて次のように表せる。

$$R_r = \frac{h}{1 - h} \quad (6a)$$

$$L_r = \frac{\sqrt{P_f^2 - 1}}{1 - h} \quad (6b)$$

はじめに、電流の位相遅れが生じないモデルとして、力率 P_f が1の場合を扱う。図-1よりこのシステムの運動方程式は次のように表される。

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 \{x_1(t) - X(t)\} = -F_e(t) \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{X}(t) - k_1 \{x_1(t) - X(t)\} + KX(t) + C_M \dot{X}(t) \\ = F_e(t) + F(t) \end{aligned} \quad (7b)$$

ここで、一般性を持たせるため、次の無次元項を導入する。

$$\begin{aligned} \zeta_M &= \frac{C_M}{2\sqrt{MK}}, & \zeta_e &= \frac{c_e}{2\sqrt{m_1 k_1}} \\ \mu_1 &= \frac{m_1}{M}, & \gamma_1 &= \frac{\sqrt{K/M}}{\sqrt{k_1/m_1}}, & \lambda &= \frac{\omega}{\sqrt{K/M}} \end{aligned}$$

ただし、

$$c_e = \frac{k_{emf}^2}{r} \frac{1 + R_r}{L_r^2 + (1 + R_r)^2} \quad (8)$$

式(8)より、減衰比 ζ_e は回路の抵抗比 R_r を変化させることで数オーダーレベルの幅広い調整が可能である。なお、同調質量系発電デバイス—橋梁間の減衰は発電電力に影響を与えるものの、本研究で行っている単質点系と二質点系の比較という観点では影響を及ぼさないと考えられることから、本研究では同調質量系発電デバイス—橋梁間の減衰の影響を検討対象としていない。ここで、無次元項 $\overline{k_{emf}}$ を導入すると k_{emf} は次のように表せる。

$$k_{emf} = \overline{k_{emf}} \sqrt{\frac{\mu_1}{\gamma_1} r \sqrt{MK}} \quad (9)$$

ただし、

$$\overline{k_{emf}} = \sqrt{2\zeta_e \frac{L_r^2 + (1 + R_r)^2}{1 + R_r}}$$

ここで、力 F_0 を静的に作用させた時の橋梁 M の変位を静的変位 X_0 と定義すると、橋梁の定常振動変位の振幅 $X_{\max}$ と X_0 の比である変位振幅比 $\overline{X_{\max}}$ は次のように表せる。

$$\overline{X_{\max}} = \frac{X_{\max}}{X_0} = \frac{X_{\max}}{F_0 / K} \quad (10)$$

定常振動下において、振動系に対する発電電力の振幅を無次元化したものを発電電力比 $\overline{W_{\max}}$ と定義すると次のように表せる。

$$\overline{W_{\max}} = \frac{RI_{\max}^2}{F_0^2 / \sqrt{KM}} \quad (11)$$

以上より、発電電流 I と変位 X の伝達関数をラプラス変換($s = j\omega$)より求めると次式のようにになる。

$$GI(s) = -\frac{Mk_{emf}\mu_1 s^3}{D_1(s) + D_2(s) - d_4(s)} \quad (12a)$$

$$GX(s) = \frac{k_{emf}^2 s + d_1(s)d_2(s)}{D_1(s) + D_2(s) - d_4(s)} \quad (12b)$$

ただし、

$$D_1(s) = k_{emf}^2 s \{d_2(s) + d_3(s)\}$$

$$D_2(s) = d_1(s)d_2(s)d_3(s)$$

$$d_1(s) = sL + r(R_r + 1)$$

$$d_2(s) = M\mu_1 s^2 + K\mu_1 / \gamma_1^2$$

$$d_3(s) = K + C_M s + Ms^2 + K\mu_1 / \gamma_1^2$$

$$d_4(s) = d_1(s)K^2\mu_1^2 / \gamma_1^4 + 2sKk_{emf}^2\mu_1 / \gamma_1^2$$

単質点同調質量系発電デバイスの発電と制振の特性を考えるため、伝達関数より導かれるシステムの応答を用いて、加振力の振動数比 λ と減衰比 ζ_e に対する発電電力比と変位振幅比の等高線図を図-3と図-4に示す。橋梁の減衰比 ζ_M が発電デバイスのパラメータに与える影響は小さく、ここでは一般的な鋼橋上部工の減衰比0.02とし、質量比 μ_1 は0.0011 (1.1%)とする。質量比は後述する二質点系の主マスと副マスの合計の質量比と等しくなるように設定している。図-3の赤い丸は発電電力比が極大となる位置を示し、破線はそのときの ζ_e を示している。図-4の青い丸は変位振幅比の極大値が最小となる位置を示し、破線はそのときの ζ_e を示している。

図-5と図-6は ζ_e が0.01, 0.03, 0.05のときの発電電力比スペクトルと変位振幅比スペクトルを表している。図-3と図-5より、発電電力比は ζ_e に対して鋭敏であり、 ζ_e のわずかな変化で発電電力比が急激に低下してしまう。そのため実際に設計を行う際は、 ζ_e の厳密な調整が重要といえる。図-3と図-4および図-5と図-6の比較より、大きな発

図-3 単質点系の減衰比と発電電力比スペクトルの等高線図

図-5 単質点系の減衰比変化と発電電力比スペクトル

図-4 単質点系の減衰比と変位振幅比スペクトルの等高線図

図-6 単質点系の減衰比変化と変位振幅比スペクトル

発電電力比スペクトルを与える ζ_e と小さな振幅比スペクトルを与える ζ_e は一致しないことが分かる。すなわち単質点同調質量系発電デバイスにおいて、橋梁の振動制御を目的とした設計と橋梁振動発電を目的とした設計では、パラメータの設計値が異なることを示している。なお、本研究は伝達関数より導かれるシステムの応答に着目しているため、これらの傾向は加振条件によらない傾向であると考えることができる。

3. 二質点同調質量系発電デバイス

次に、図-7に示す二質点系の同調質量系発電デバイス—橋梁に関して解析を行う。すなわち、ばね定数 K のばねと減衰定数 C_M のダンパーで支持された橋梁の等価質量 M があり、等価質量 M には、ばね、電磁誘導型発電装置および2つの質量である主マス m_1 と副マス m_2 で構成された二質点同調質量系発電デバイスが付加されている。

質量 M に調和外力 $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ が作用した時、質量 M の変位を $X(t)$ 、二質点同調質量系発電デバイスの m_1 、 m_2 の変位を $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ とする。このシステムの運動方程式は次のようになる。

$$m_1 \ddot{x}_2(t) + k_2 \{x_2(t) - x_1(t)\} = -F_e(t) \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1(t) + k_1 \{x_1(t) - X(t)\} \\ - k_2 \{x_2(t) - x_1(t)\} = +F_e(t) \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\begin{aligned} M \ddot{X}(t) - k_1 \{x_1(t) - X(t)\} \\ - KX(t) + C_M \dot{X}(t) = F(t) \end{aligned} \quad (13c)$$

ここで、一般性を持たせるため、単質点系で用いた無次元項に加えて次の無次元項を導入する。

$$\mu_2 = \frac{m_2}{m_1}, \quad \gamma_2 = \frac{\sqrt{k_2/m_2}}{\sqrt{k_1/m_1}}, \quad \zeta_e = \frac{c_e}{2\sqrt{m_2 k_2}}$$

ただし、

$$k_{emf} = \overline{k_{emf}} \sqrt{\frac{\mu_1 \mu_2 \gamma_2}{\gamma_1} r \sqrt{MK}} \quad (14)$$

発電装置の等価回路と抵抗 R を有する同調質量系発電デバイスの電気回路は図-2に示した。ここで、減衰係数 c_e

図-7 二質点同調質量系発電デバイスの解析モデル

は式(8)で表されることから、減衰比 ζ_e は回路の抵抗比 R_r を変化させることで数オーダーレベルの幅広い調整が可能である。

発電電流 I と変位 X の伝達関数をラプラス変換($s = j\omega$)より求めると次式ようになる。

$$GI(s) = -\frac{s^3 MK k_{emf} \mu_1^2 \mu_2 / \gamma_1^2}{D'_1(s) + D'_2(s) - D_3(s) - D_4(s)} \quad (15a)$$

$$GX(s) = \frac{\{D'_1(s) + D'_2(s) - D_4(s)\} / d_3(s)}{D'_1(s) + D'_2(s) - D_3(s) - D_4(s)} \quad (15b)$$

ただし、

$$D'_1(s) = k_{emf}^2 d_3(s) \{d'_2(s) + d_5(s)\} s$$

$$D'_2(s) = d_1(s) d'_2(s) d_3(s) d_5(s)$$

$$D_3(s) = K^2 \mu_1^2 / \gamma_1^4 \{d_1(s) d'_2(s) + k_{emf}^2 s\}$$

$$D_4(s) = d_3(s) d'_4(s)$$

図-8 二質点系の減衰比と発電電力比スペクトルの等高線図

図-10 二質点系の減衰比と発電電力比スペクトル

図-9 二質点系の減衰比と変位振幅比スペクトルの等高線図

図-11 二質点系の減衰比と変位振幅比スペクトル

$$d'_2(s) = M\mu_1\mu_2s^2 + K\mu_1\mu_2\gamma_2^2/\gamma_1^2$$

$$d'_4(s) = d_1(s)K^2\mu_1^2\mu_2^2\gamma_2^4/\gamma_1^4 + 2k_{emf}^2K\mu_1\mu_2\gamma_2^2/\gamma_1^2s$$

$$d'_5(s) = d_2(s) + K\mu_1\mu_2\gamma_2^2/\gamma_1^2$$

加振力の振動数比 λ と減衰比 ζ_e に対する発電電力比と変位振幅比を図-8と図-9に示す。ここでは、主マスの橋梁に対する質量比 μ_1 は0.001 (1%), μ_2 は0.1としている。振動数比 $\gamma_1 = 0.95$, $\gamma_2 = 1$ の場合を表している。図-8の赤い丸は発電電力比の極大値の位置を示しており、破線はそのときの減衰比 ζ_e を示している。図-9の青い丸は振幅比の極大値の最小値の位置を示しており、破線はそのときの減衰比を示している。

図-10は発電電力比スペクトル、図-11は変位振幅比スペクトルがそれぞれ減衰比 ζ_e によって変化する様子を表している。図-8と図-10より、二質点系は単質点系に比べて発電電力比が ζ_e に対して鋭敏ではないことが分かる。その理由として、副マス m_2 の発電による減衰は、橋梁一質量 m_1 間のエネルギー伝達に与える影響が小さいこと

が考えられる。一方、図-9と図-11より、変位振幅比は発電電力比に比べると ζ_e に対して比較的鋭敏であるが、単質点系の変位振幅比よりは鋭敏性は小さい。発電を目的として実際に設計する際に ζ_e の厳密な調整は、単質点系と比較すると重要性が低いと考えられる。バッテリーやキャパシタなどへの充電を想定した場合、減衰力 ζ_e は一定ではない。そのため、発電電力比が ζ_e 変化に対して鋭敏でない二質点同調質量系発電デバイスの方が単質点系に比較して、充電を想定した場合でも効果的な発電や振動制御が期待できる。

なお、ここまで発電電力を無次元量 $\overline{W}_{max}$ として議論しているが、発電性能の具体的なオーダーを示すため、0.1~1mmオーダーの振動振幅を想定し、式(10)および図-11より例として橋梁の等価質量200ton, 固有振動数1Hz, 外力 $F_0=1\text{kN}$ の場合を考えると、式(11)より図-10のスペクトルはW (ワット) オーダーの発電電力となることを示している。

図-12 単質点系における発電電力比スペクトルの振動数比による影響

図-14 単質点系における変位振幅比スペクトルの振動数比による影響

図-13 二質点系における発電電力比スペクトルの振動数比による影響

図-15 二質点系における変位振幅比スペクトルの振動数比による影響

4. 単質点系と二質点系の比較

(1) 振動数比 γ_1 に対するスペクトル変化

橋梁の固有振動数の微変動を想定し、単質点と二質点同調質量系発電デバイスの振動数比 γ_1 が微変動した場合の発電電力比スペクトルを図-12と図-13に、変位振幅比スペクトルを図-14と図-15にそれぞれ示す。ここでは γ_1 の変動前と2%減少、4%減少の場合のスペクトルを示している。 γ_1 が減少すると発電電力比のスペクトルは右にシフトし、そのピーク値も減少することが分かる。橋梁の固有振動数の変化に合わせてTMDの質量やばね定数を調整することで γ_1 を調整することも考えられるが、一般にTMDの大きな質量やばねを橋梁の現場で交換や調整を行うことは困難である。単質点系の場合、比較的簡単に調整できるパラメータは減衰比 ζ_e である。しかしながら、 ζ_e は発電電力比や変位振幅比のピーク値の大きさを変化させるが、ピークの位置を移動させることはでき

ないため、 γ_1 の変化に対する調整方法としては効果的ではない。二質点系においても単質点系と同様に、 γ_1 が減少すると発電電力比スペクトルは右に移動し、ピーク値が減少する。また、変位振幅比スペクトルの左のピーク値が増加し、振動制御性能は失われてしまう。しかしながら二質点系の場合、質量の小さい μ_2 に関するパラメータは調整が比較的容易で現場での調整が可能と考え、 μ_2 の調整でスペクトルのピーク位置を移動できる。ピーク値の大きさは γ_2 または ζ_e で調整できるため、 γ_1 が変化した場合も μ_2 と γ_2 または ζ_e の調整で対応できる。

図-16と図-17は二質点系において γ_1 の変化の影響を考慮したパラメータ調整後の発電電力比と変位振幅比スペクトルをそれぞれ示している。ここでは γ_1 、 μ_1 、 ζ_e は固定値として、 γ_2 と μ_2 を γ_1 の変化に合わせてそれぞれ調整した値を用いている。一般にTMDは振動数比に対して鋭敏であるが、実際に調整を行う際には様々な制約のためパラメータ値を設計値と一致できることはまれであり、

図-16 二質点系における振動数比による影響を考慮したパラメータ調整後の発電電力比スペクトル

図-18 単質点系における発電電力比スペクトルの力率による影響

図-17 二質点系における振動数比による影響を考慮したパラメータ調整後の変位振幅比スペクトル

図-19 二質点系における発電電力比スペクトルの力率による影響

その意味でも現場での微調整が重要であった。そのため、現場での調整が比較的容易に行えるパラメータが多い二質点同調質量系発電デバイスは単質点系に比べて現場適用性の観点で有利といえる。

(2) 力率 P_f に対するスペクトル変化

電磁誘導型の発電装置はコイルに起因する電圧と電流の位相差が発生するため、力率 P_f は一般に100%ではない。図-18と図-19は P_f を変化した時の、単質点系と二質点系の同調質量系発電デバイスの発電電力比スペクトルを表している。単質点系と二質点系ともに力率が低下すると発電電力比スペクトルのピーク値が低下し、特に単質点系ではスペクトルが横方向にシフトしていることが分かる。そのため、同調質量系発電デバイスの設計において、力率を考慮することが重要である。力率を考慮した設計として次の2つが考えられる。

a) 力率改善回路の導入

b) 力率を考慮したパラメータ調整

a)は電気回路に力率改善回路 (Power Factor Correction: PFC) として図-20のようにコンデンサ C を直列に繋ぎ、発電装置内部のコイルによる遅れ位相をコンデンサの進

図-20 力率改善用キャパシタを含む回路

図-21 二質点系における力率による影響を考慮したパラメータ調整後の発電電力比スペクトル

図-22 単質点系における変位振幅比スペクトルの力率による影響

図-23 二質点系における変位振幅比スペクトルの力率による影響

図-24 二質点系における力率による影響を考慮したパラメータ調整後の変位振幅比スペクトル

み位相で打ち消すことで力率を1に近づける方法である。このとき回路の力率 P_f は次式で表される。

$$P_f = \frac{1 + R_r}{\sqrt{(L_r - C_r)^2 + (1 + R_r)^2}} \quad (16)$$

ただし、

$$C_r = \frac{1}{\omega r C}$$

C_r は無次元化されたコンデンサの静電容量である。式(16)より、力率が1となるのは $C_r = L_r$ のときである。力率改善回路の設計では発電装置内部のコイルのインダクタンス L が既知であることが必要となる。

b)の力率を考慮したパラメータ設計に関して、図-21に示すように二質点系の発電電力比スペクトルはパラメータ設計によって力率100%の場合のスペクトルと等しくことができる。単質点系の場合 γ_1 を調整できれば力率100%の場合のスペクトルと等しくなるが、二質点系の場合は γ_1 を調整する必要がなく μ_2 、 γ_2 または ζ_e を調整すればよい。二質点系では調整が比較的容易なパラメータのみを用いて力率を考慮した調整ができるため、単質点系に比べて適用性が高いといえる。

P_f を変化させた時の変位振幅比スペクトルを表している図-22と図-23においても、単質点系と二質点系ともに力率が低下すると変位振幅比スペクトルのピーク値が上昇し、制振機能が失われてしまう。変位振幅比スペクトルに関して力率を考慮した二質点系のパラメータ設計を行ったものを図-24に示す。発電電力比スペクトルと同様、パラメータ設計によって力率100%の場合と等しくすることができる。

5. 結論

本研究では、橋梁振動を対象とした環境発電デバイス(Energy Harvester)として、TMDのダンパーを電磁誘導型の発電装置に置き換えた同調質量系発電デバイスを考え、単質点と二質点の同調質量系発電デバイスのモデリングを提案し、それらの比較から有利な装置構成について検討を行い、制振と発電効率の減衰比や橋梁の固有振動数変化に対する鋭敏性、力率による影響など同調質量系発電デバイスの設計に関する特性を検討した結果、得られた知見を以下に示す。

- (a) コイルを有する等価回路で電磁誘導型発電装置を表現し、ダッシュポッドモデルを用いずに発電装置の減衰力を回路式より導くことで、発電装置の力率に起因する減衰力の位相遅れが発電電力や振動制御に与える影響を考慮したモデリングを提示した。
- (b) 運動方程式と回路式を用いて、単質点と二質点同調

質量系発電デバイスの発電電力比と変位振幅比の伝達関数を示した。その結果、二質点系は発電電力比が減衰比に対して比較的鋭敏でないことを示し、減衰比が変化する充電回路において二質点系は効果的な発電や振動制御が行えることを示した。

- (c) 橋梁の振動制御を目的とした設計と、振動発電を目的とした設計では設計値が異なることを明らかにし、減衰比の調整によって制振と発電のバランスを目的に合わせて設計できることを示した。
- (d) 発電を目的とした場合、二質点系は比較的容易に調整可能な μ_2 、 γ_2 または ζ_e によって振動数比 γ_1 の変化に対応できることを導き、調整可能なパラメータが多い二質点系が単質点系に比べて現場適用性の観点で有利であることを示した。
- (e) 力率を考慮した設計が重要であることを導き、力率改善回路を用いる設計方法と同調質量系発電デバイスのパラメータ調整によって設計する方法をそれぞれ提示した。力率の影響を考慮した設計において、二質点系は調整が容易なパラメータを多く有するため、現場適用性が高いことを示した。

本研究より、0.1~1mmオーダーの振動振幅を想定し、橋梁の等価質量200ton、固有振動数1Hz、外力 $F_0=1\text{kN}$ の場合を考えると、ワットオーダーの発電電力が期待できることが示された。バッテリーなどへの充電回路を含めた同調質量系発電デバイスでは、強い非線形性のため加振力の履歴と大きさによって発電や振動制御の効果が異なる。これを今後解決することで、橋梁振動を対象としたより高効率な発電が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 吉田善紀, 小林裕介, 内村太郎: 鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 A, Vol. 70, No.2, pp.282-294, 2014.
- 2) 長船寿一, 中村俊一, 水野恵一郎, 加藤久雄, 上田知孝: 道路橋振動対策としての運動量交換型衝撃吸収ダンパーの研究, 構造工学論文集 A, Vol.56A, pp.237-250, 2010.
- 3) 吉田善紀, 小林裕介, 和田一範: 鋼鉄道橋の振動発電を利用した充電手法の動態観測モニタリングへの適用, 構造工学論文集 A, Vol.61A, pp.532-543, 2015.
- 4) 井上竜太: 振動発電を利用したエコ工事振動対策技術の開発, 竹中技術研究報告, No.68, pp.1-8, 2012.
- 5) 井上竜太, 安倍隆之, 平林信二: 空調設備の振動発電利用に関する研究 その2 振動発電デバイスと低消費電力型無線センサモジュールを用いた検証試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1351-1352, 2013.
- 6) Cassidy, I. L., Scruggs, J. T., Behrens, S. and Gavin, H. P.: Design and experimental characterization of an electromechanical transducer for large-scale vibratory energy harvesting applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 17, pp. 2009-2024, 2011.

- 7) Shen, W., Zhu, S. and Xu, Y. : An experimental study on self-powered vibration control and monitoring system using electromagnetic TMD and wireless sensors, *Sensors and Actuators A*, Vol. 180, pp. 166-176, 2012.
- 8) 田中実, 鈴木正夫 : 地上コイル異常検知センサ用給電装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.17-22, 2013.
- 9) Zhu, S., Shen, W. and Xu, Y. : Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing, *Engineering Structures*, Vol. 34, pp. 198-212, 2012.
- 10) Arroyo, E., Badel, A., Formosa, F., Wu, Y. and Qiu, J. : Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: Model and experiments, *Sensors and Actuators*, Vol. 183A, pp. 148-156, 2012.
- 11) 山口浩, 佐々木栄一, 峰沢ジョージヴウルペ : エレクトレット振動発電素子を用いたパッシブ型振動速度センサの開発, 土木学会論文集 A, Vol.70, No.2, pp.150-160, 2014.
- 12) Suzuki, Y., Miki, D., Edamoto, M. and Honzumi, M. : A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, No. 10, 2010.
- 13) 赤澤輝行, 村尾景司, 岡田幸弘 : フリーピストンスターリングエンジン用リニア発電機の研究, 日本機械学会 [No.05-39], 第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.33-34, 2005.
- 14) 星野健, 吉原正一, 赤澤輝行, 村尾景司 : 新形式リニア発電機の性能試験, 日本機械学会 [No.05-39], 第10回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.109-110, 2006.
- 15) Liang, J. and Liao, W. : Impedance matching for improving piezoelectric energy harvesting systems, *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2010*, Vol. 7643, 2010.
- 16) Cassidy, I. L. and Scruggs, J. T. : Nonlinear stochastic controllers for power-flow-constrained vibratory energy harvesters, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, pp. 3134-3147, 2013.
- 17) Sgobba, S. and Marano, G. C. : Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1739-1755, 2010.
- 18) Lee, C., Chen, Y., Chung, L. and Wang, Y. : Optimal design theories and applications of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 43-53, 2006.
- 19) 堀内博, 藤沢伸光, 津村直宜 : TMD の設計における実用算定式, 構造工学論文集 A, Vol. 37A, No.2, pp.781-788, 1991.
- 20) 吉住文太, 佐野健一, 井上浩男 : 少数個 TMD の最適ロバスト設計, 構造工学論文集 A, Vol. 48A, No. 1, pp.329-338, 2002.
- 21) 阿部雅人, 藤野陽三 : マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の性能評価式, 土木学会論文集, No.465/I-23, pp.97-106, 1993.
- 22) 潘公宇, 安田正志 : 多重動吸振器のロバスト最適設計方法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.712, pp.96-102, 2005.
- 23) Faisal, A. R. M., Hong, C. and Chung, G. : Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever, *Sensors and Actuators A*, Vol. 182, pp. 106-113, 2012.
- 24) Tang, X. and Zuo, L. : Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, pp. 5199-5209, 2011.
- 25) Tang, X. and Zuo, L. : Vibration energy harvesting from random force and motion excitations, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 1-9, 2012.

(2015. 2. 23 受付)

CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF TUNED MASS ENERGY HARVESTER FOR BRIDGE VIBRATION

Kouichi TAKEYA and Eiichi SASAKI

A bridge vibration energy harvester has been proposed in this paper using a Tuned Mass Damper (TMD) system, named hereafter tuned mass energy harvester. To harvest and make use of the unused reserve of energy the aforementioned damper system absorbs, an electromagnetic transducer has been applied. To investigate the configuration of the tuned mass energy harvester considering performances of bridge vibration control and energy harvesting, single-mass and dual-mass systems where one or two masses are connected in series with the electromagnetic transducer and spring are proposed. According to the theory of vibrations and electric circuits, it has been clarified that dual-mass systems have several advantages over single-mass systems for power generation and vibration control. It has also been clarified that for effective energy harvesting or vibration control, it is essential to consider the power factor of electromagnetic transducer and electric circuit.