電車用 LIM の電磁振動に関する二、三の検討

Some Considerations on Electromagnetic Vibration in a LIM for a Train

遠藤 悟・菊地新喜・海老塚龍次*

東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (☎985-8537)

*東洋電機製造(株), 横浜市金沢区福浦 3-8 (☎236-0004)

S. Endo, S. Kikuchi, and R. Ebizuka*

Faculty of Engng., Tohoku Gakuin Univ., 1-13-1 Chou, Tagajo 985-8537

*Toyo Denki Seizo K. K., Yokohama Works, 3-8 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0004

This paper considers the generation of noise in a linear induction motor (LIM) used in a linear motor car. Frequency analysis of the electromagnetic vibration established that the noise in the LIM was generated mainly by the electromagnetic attractive force between the primary member and the reaction plate (RP) and that also by high-frequency flux due to the input current supplied from a VVVF inverter.

Key words: LIM, noise, electromagnetic vibration, electromagnetic attractive force, high-frequency flux

1. ま え が き

リニア誘導モータ（以下 LIM）は、始動推力が大きく、速度制御が容易であり、さらに構造が簡単で大推力化、軽量化することができるなどの特徴をもつことから、リニアモータカーの駆動源をはじめとして広く利用されており、実際に小形地下鉄などでも実用化されている。しかし、電磁氣的騒音が大きいことから、LIM を各種輸送システムに利用するには騒音を低減する必要がある。

そこで、本研究では LIM の騒音の発生要因について検討するために、鉄心材質とコア締付力のそれぞれ異なる LIM の小形モデルを用いて、騒音レベルによる定量的検討や騒音、振動、磁束の各周波数分析などを行い、これらの検討結果から LIM の騒音は磁歪よりも電磁力の影響が主であり、インバータの方形波電流による影響が大きいことを明らかにした^{1)~3)}。今回は、騒音の低減化をさらに検討するために、騒音、振動と空隙磁束の関係について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

Fig. 1(a), (b) に振動の測定外観図と測定点を示す。図では省略してあるが各スロットには巻線が巻いてあり、通常、2次導体（以下 RP）はメカニカルギャップを 2 mm とした状態で Fig. 1(b) に示ように 4 カ所をベアリングによって支持している。振動の測定点は、同図に示すように鉄心の真上の点である P1~P39 と積層鉄心に平行な点である P13', P39' とした。

振動の周波数分析は、図に示した各測定点にそれぞれ振動ピックアップを設置し、その振動ピックアップで得られた振動を FFT アナライザを用いて行った。なお、LIM の駆動電源にはそれぞれ商用電源と VVVF インバータ（スイッチング周波

Fig. 1(a) Measurement system.

Fig. 1(b) Measurement point.

数 $f_s=437$ Hz) を用いた。

Fig. 2 にインバータ駆動時における LIM の入力電圧の波形を示す。この図に示すように、インバータ駆動時の LIM の入力電圧は方形波であるため、インバータ駆動時の空隙磁束密度には正弦波電源駆動時に比べて時間高調波成分が含まれる。

実験には、磁歪による影響以外の発生要因について検討を行うために、鉄心材質に磁歪が最も小さいとされる 6.5% けい素鋼板（板厚 0.35 mm）を用い、コア締付力を 55 kg・cm とした LIM を用いた。LIM の寸法は Fig. 1(a) に示したとおりである。

3. 実験結果

3.1 駆動電源の違いによる振動の影響

Fig. 3 と Fig. 4 に PR を装着した状態で LIM を商用電源と

Fig. 2 Waveform of input voltage supplied from the VVVF inverter.

インバータで駆動したときの鉄心の真上の測定点 P20 における振動を測定した結果を示す。図において横軸は周波数であり、縦軸は振動加速度である。また、 $a_{\text{overall}}(\text{m/s}^2)$ の値は全体の振動量を表している。これらの図を比較すると、Fig. 3 には電源周波数の影響と思われる 100 Hz のピークのみが見られるのに対し、Fig. 4 には 100 Hz 以外にも種々のピークが現れている。これは、Fig. 2 に示したインバータの方形波電流による時間高調波磁束の影響によるものと思われる。さらに a_{overall} の値を比べてみると、Fig. 3 よりも Fig. 4 の方が約 3 倍ほど振動が大きくなっていることがわかる。

3.2 磁気吸引力による振動の影響

Fig. 5 に RP を装着した状態で LIM をインバータで駆動したときの積層した鉄心に平行な測定点 P39' における振動を測定した結果を示す。この図と Fig. 4 を比較してみると、Fig. 4 に 100 Hz, 900 Hz, 1.2 kHz などの低周波領域に大きなピークが見られるのに対して、Fig. 5 には鉄心の固有振動数であると考えられる¹⁾ 4.4 kHz, 4.6 kHz をはじめとする高周波領域に大きなピークが見られる。これらのピークの発生要因としては、Fig. 4 の低周波領域のピークは空隙に働く磁気吸引力の影響によって現れたものと考えられ、Fig. 5 に現れている比較的高い周波数領域のピークは、積層された鉄心間の振動によるものと考えられる。また、 a_{overall} の値を比較してみると、Fig. 4 の方が約 3.5 倍ほど振動が大きくなっていることがわかる。

Fig. 6 に LIM をインバータで駆動したときの RP⑪ における振動の測定結果を示す。なお、RP⑪ は RP の測定点であり、LIM の測定点 P20 の真上に位置している。この図と Fig. 4 を比較してみると、どちらにも磁気吸引力の影響であると考えられる 100 Hz, 900 Hz, 1.2 kHz などにピークが見られるが、これらのピークは Fig. 6 の方が大きく現れており、LIM よりも RP の方が磁気吸引力によって大きく変形、振動していることが了解される。 a_{overall} の値を比較しても、RP の方が約 4 倍ほど大きく振動していることから、LIM の騒音は、磁気吸引力による影響が大きいものと思われる。なお、3.3 kHz のピーク関しては巻線間の振動の影響によるものと思われる。

3.3 振動と磁束の関係

Fig. 7 は RP を装着した状態で LIM をインバータで駆動し

Fig. 3 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

Fig. 4 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

Fig. 5 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

たときの P26 (LIM の端部) における振動の測定結果である。この図と Fig. 4 (LIM の中央部) を比較すると、Fig. 7 に若干鉄心間の振動の影響と思われる 4.5 kHz, 4.9 kHz などのピークが見られるが、吸引力の影響と考えられる低周波のピークは Fig. 4 の方が大きく a_{overall} の値を比べてみても、Fig. 4 の方が大きく振動していることがわかる。

Fig. 8 に RP を装着した状態での LIM の鉄心部とスロット部における磁束密度分布を測定した結果を示す。このグラフを見ると、磁束密度は LIM の両端部よりも中央部の方が大きくなっており、Fig. 4 と Fig. 7 の振動の大小関係とよく一致していることがわかる。

次に、磁束密度と振動の関係をより詳しく検討するために、

Fig. 6 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

Fig. 7 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

磁束密度を変化させたときの振動の測定を行った。ここでは、LIMの入力電流の値がインバータによって決定されているために、空隙の大きさにより磁束密度を変化させて振動の測定を行った。

Fig. 9 に空隙長と磁束密度の関係を示す。このグラフより磁束密度は空隙長にほぼ反比例して減少することが了解される。

Fig. 10 は LIM を空隙長が 8 mm の状態でインバータで駆動させたときの P20 の振動の測定結果である。この図と空隙長が 2 mm である Fig. 4 を比較すると、どちらにも 100 Hz, 900 Hz, 1.2 kHz, 3.3 kHz などピークが見られるが、磁気吸引力の影響と考えられる 100 Hz, 900 Hz, 1.2 kHz のピークが空隙長を大きくすることにより小さくなっていることがわかる。また、 a_{overall} の値を比べても全体的に振動が減少していることが了解される。

この騒音の主要因として考えられる磁気吸引力の式は、以下のように示されている^{4), 5)}。いま、 n 次、 m 次の空間高調波磁束を (1) 式、(2) 式のように与えると、

$$b_n = B_n \sin\left(\omega_0 t - n \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (1)$$

$$b_m = B_m \sin\left(\omega_0 t - m \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (2)$$

正弦波電流で駆動した場合の吸引力は、次の (3) 式のようになる。

Fig. 8 Distribution of flux density in the LIM.

Fig. 9 Relation between gap and flux density.

$$F_{nm} = K_1 \times B_n B_m \left[\cos \left\{ (n-m) \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x \right\} - \cos \left\{ 2\omega_0 t - (n+m) \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x \right\} \right] \quad (3)$$

ここで、 K_1 : 係数、 B_n, B_m : b_n, b_m の最大値、 n, m : 空間高調波次数、 ω_0 : 電源角周波数、 P : 極数、 τ : 極ピッチ、 x : 固定子側座標である。

次に、インバータで駆動した場合、時間高調波成分が存在するのでこの場合の吸引力は、次の (4) 式のようになる。

$$F_{nmij} = K_2 \times B_{ni} B_{mj} \left[\cos \left\{ (i-j)\omega t - (n-m) \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x \right\} - \cos \left\{ (i+j)\omega t - (n+m) \frac{1}{P/2} \frac{\pi}{\tau} x \right\} \right] \quad (4)$$

ここで、 K_2 : 係数、 B_{ni}, B_{mj} : b_{ni}, b_{mj} の最大値、 n, m : 空間高調波次数、 i, j : 時間高調波次数、 α, β : 定数である。

また、電源周波数とスイッチング周波数との関係は、次の (5) 式のようになっている。

$$(i \pm j)\omega = \alpha\omega_s \pm \beta\omega_0 \quad (5)$$

$$\alpha = 1, 3, 5, \dots \quad \beta = 0, 2, 4, \dots$$

$$\alpha = 2, 4, 6, \dots \quad \beta = 1, 3, 5, \dots$$

ここで、 ω_s : スwitchング角周波数、 α, β : 定数である。

以上に示した式から、商用電源駆動時に見られる 100 Hz は電源周波数 50 Hz の 2 倍、インバータ駆動時に見られる 900 Hz は、スイッチング周波数 437 Hz の 2 倍 ($\alpha=2$) と電源周波

Fig. 10 Frequency analysis of an electromagnetic vibration.

Fig. 11 Relation between flux density and the electromagnetic vibration.

数 50 Hz ($\beta=1$) の和によるものと考えられ、これらは基本波磁束分布の不均一性により発生したものと思われる。さらに、インバータ駆動時に見られる 4.3 kHz, 4.4 kHz などのピークはスイッチング周波数 437 Hz の 10 倍 ($\alpha=10$) と電源周波数 50 Hz ($\beta=1$) の和と差によるものと考えられる。

Fig. 11 に LIM の磁束密度と振動加速度の関係を示す。この図から (3), (4) 式で示した吸引力と同様に振動の大きさが磁束密度の二乗に比例していることが了解できる。

このことから空隙磁束密度低減による振動の低下が考えられるが、同時に推力も減少してしまうため、推力と吸引力との関連性について検討する必要がある。

4. ま と め

振動の周波数分析から LIM より発生している騒音は、おもに空隙に生じる電磁力による LIM および RP 自身の振動や積層された鉄心間の振動によるものであると推測され、この振動の大きさは磁束密度の二乗に比例していることがわかった。また、これらの振動は明らかにインバータの方形波電流による時間高調波磁束の影響が大きく、この高調波磁束によって生じる磁気吸引力が騒音発生の主要因として考えられる。

これらのことを考慮し、LIM の騒音を低減するには LIM や RP の振動を最小に抑える構造にし、必要な推力が得られる程度に磁束密度を小さくし、LC フィルタなどを用いてインバータによる時間高調波の発生を小さくすれば、かなり騒音は低減できるものと考えられる。

文 献

- 1) 橋本, 菊地, 鈴木, 阿部: 第 19 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 25pB-7 (1995).
- 2) S. Kikuchi, Y. Hashimoto, and R. Ebizuka: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 5031 (1996).
- 3) 遠藤, 菊地, 海老塚: 第 21 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 5aE-12 (1997).
- 4) 石橋, 野田, 森: 電気学会論文誌 D, **112**, 307 (1992).
- 5) 田上, 田中, はか: 電気学会交通電気鉄道研究会論文集, TER-91-24 (1991).

1997 年 10 月 29 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録