

EV用インバータの応急運転法の研究

石川 智朗*¹ 森本 雅之*²

EV Traction at Inverter Faulty Condition

by

Tomoaki ISHIKAWA*¹ and Masayuki MORIMOTO*²

(Received on Mar. 31, 2009 and accepted on July. 6, 2009)

Abstract

This paper proposes a novel traction method for inverter fault. The proposed method realizes the limited operation of vehicles in emergency condition. The method requires some repair on site such as replacement of burst tires. The proposed method is the drive of 3-phase motor by 2-phase inverter. Experimental result shows that the maximum speed reduces to 40% and maximum power reduces to 40%. However, the system efficiency of the 2-phase inverter system is same as that of the 3-phase inverter system. The result shows that the proposed method can be used for the emergency drive of EVs.

Keywords: Inverter, PWM, Induction Motor, EV

1. まえがき

近年、石油の高騰や地球温暖化などの環境問題が社会的に大きな問題となっている。そのため、石油の代替エネルギーの実用化や温室効果ガスの削減が望まれる。これらの問題を解決すべく、電気自動車の実用化を目指した開発が進められている¹⁾。今後、内燃機関駆動の自動車に代わり、電気自動車が普及するものと考えられる。

電気自動車の普及に伴い、故障対策を考える必要がある。電気自動車はインバータ故障が発生すると自走できなくなる。Fig. 1に示すように、バッテリーに蓄積された直流電力は、インバータにより交流電力に変換されてモータを駆動する。もし、インバータが故障するとモータ駆動に必要な交流電力に変換する手段が無くなってしまふ。そのため、インバータ故障時に電気自動車を移動するには牽引による方法しか無い。応急的にある程度の距離を自走できる方法が必要である。なおかつ、その方法はタイヤがパンクした際に、スペアタイヤに交換する程度の内容の作業と時間であることが望ましい。

通常、インバータの故障は、アームと呼ばれるインバータのスイッチ対(スイッチはIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)で構成される)がペアで故障するアーム故障が起きることが多い。このような場合、6個のスイッチのうち2個のみ故障しており4個のスイッチは健全な状態である。このとき、残された4個のスイッチで2アームを構成した2相インバータにより、3相交流電力を出力することが可能である^{2)~6)}。

そこで本研究では、インバータ回路にアーム故障が発生し、1つのアームが使用なくなった場合に、残りの2つのアームによって応急的に3相モータを駆動する方法を取り上げる。本論文は、その方法によりEVの駆動モータがどのような特性となるかを明らかにするものである。

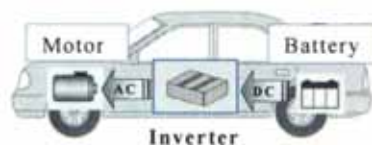


Fig. 1 Driving system of EV

2. 2相インバータについて

2.1 2相インバータの構成

電気自動車のインバータ回路のIGBT対が故障する。そのとき残った4つ(2相)のIGBTで2相インバータ回路が構成可能である。この回路をFig. 2に示す。具体的には故障アームの配線を取り外し、故障したアームに接続されていたモータへの配線を、バッテリーの電圧中間点につなぎ換える。この回路変更で2相インバータ回路が構成できる。

*1 工学研究科電気電子システム工学専攻

*2 電気電子工学科教授

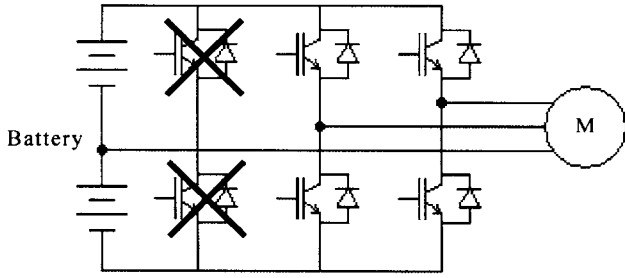


Fig. 2 Two phase inverter

2.2 原理

2相インバータの原理を Fig. 3. を用いて説明する。2つの正弦波交流電源をもつ回路において、式(1)に示すように、2つの交流電源 v_1 と v_2 の位相差を 60° とする。このとき、式(2)に示すように、3相負荷に得られる相電圧は3相平衡となる。

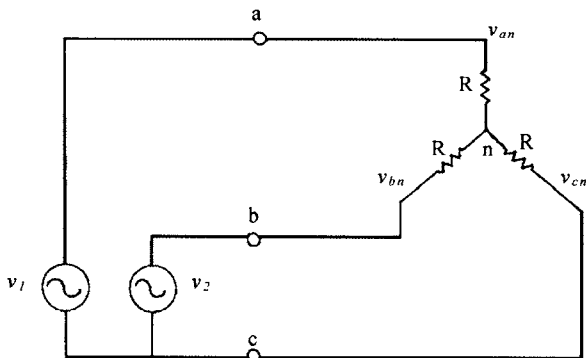


Fig. 3 Sinusoidal circuit

$$\begin{cases} v_1 = V_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{3}) \\ v_2 = V_0 \cdot \sin \omega_0 t \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_0 \cdot \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}) \\ v_{bn} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_0 \cdot \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{6}) \\ v_{cn} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_0 \cdot \sin(\omega_0 t - \frac{5\pi}{6}) \end{cases} \quad (2)$$

さらに、Fig. 4. に示すように、交流電源 v_1 , v_2 の位相を変更すれば 3 相電圧の回転方向が逆転する。

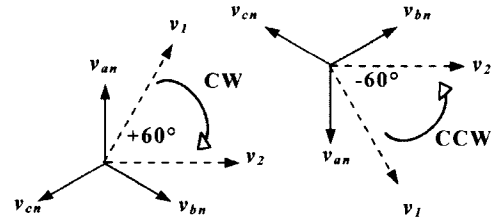


Fig. 4 Phasor diagram of voltage

3. 2相インバータの実現可能性の検討

2章で示した原理は正弦波で成立することを示したものである。インバータの場合、出力電圧はスイッチの ON - OFF で作成される擬似正弦波である。そこで、インバータのスイッチングにより、どのような結果が得られるかをシミュレーションにより検討した。

3.1 シミュレーション

2相インバータを PWM 制御し、抵抗負荷を用いたシミュレーションにより出力線間電圧を求めた。シミュレーションは PSIM を用いた。シミュレーションに用いた回路を Fig. 5 に示し、シミュレーション条件を Table 1 に示す。今回のシミュレーションでは b 相を基準に a 相を 60° 位相を遅らせている。インバータは 5kHz のスイッチングで PWM 波形を出力する。PWM 波形の作成方法は Fig. 6 に示す三角波比較法によって行う⁷⁾。

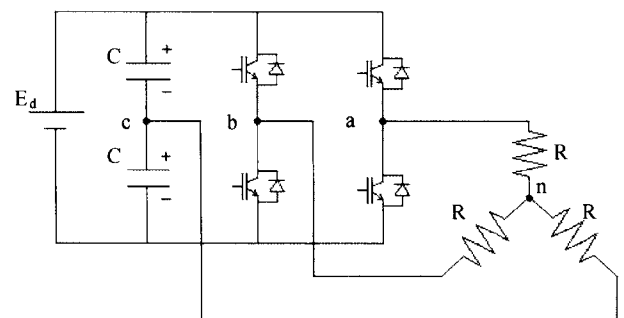


Fig. 5 Simulation circuit

Table 1 Parameters for simulation

| Sign | Name | Value |
|-------|------------------------|--------------|
| E_d | DC voltage | 283V |
| C | Capacitors | 8200 μ F |
| F | Frequency of sine wave | 50Hz |
| F_c | Carrier frequency | 5kHz |
| M | Modulation factor | 0.99 |
| R | Resistors | 10 Ω |

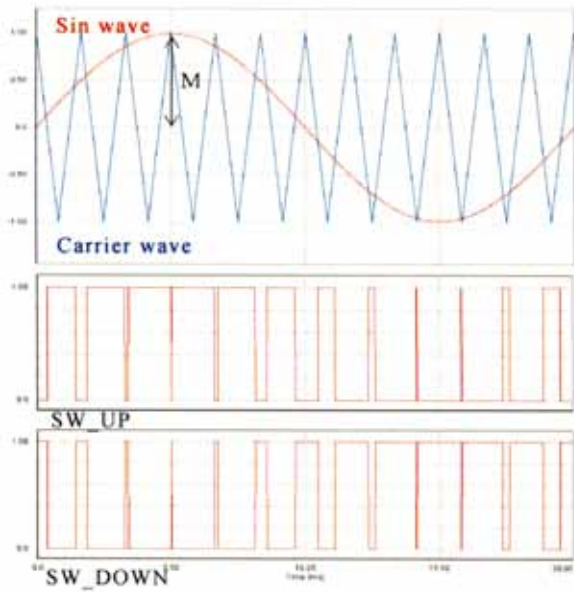


Fig. 6 Principle of PWM

3.2 シミュレーション結果

シミュレーションにより得られた線間電圧のスペクトルを Fig. 7 に示す．線間電圧の実効値 V_{rms} ，基本波実効値 V_1 ，電圧利用率 U を計算して Table 2 に示す．計算式は式(3)～(5)を用いた．ここで V_{pn} は n 次の高調波成分の波高値を示す． $n=1$ の場合は基本波の波高値である．電圧利用率 U は直流電源 E_d に対し，得られる基本波波高値の最大値 ($M=1$ の場合) を示す．

$$V_n = \frac{V_{pn}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (V_n)^2} \quad (4)$$

$$U = \left(\frac{V_{p1}}{E_d} \right) \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Table 2 に示すように実効値電圧 V_{rms} は 3 相不平衡である．しかし，基本波実効値 V_1 は 3 相平衡である．式(4)で示されるように実効値は高調波成分と基本波成分の和である．そのため，各相の高調波の違いが，結果的に実効値の不平衡となったためと考えられる．

シミュレーションの結果，次のことが明らかになった．

- [1] 基本波は 3 相平衡である．基本波はモータトルクの発生に関係するので，滑らかなモータトルクが発生する可能性がある．
- [2] 高調波は不平衡である．高調波はトルクに関係が少なく，損失となる．

そこで，次章で実験により，2 相インバータによるモータ駆動が可能かどうか検討する．

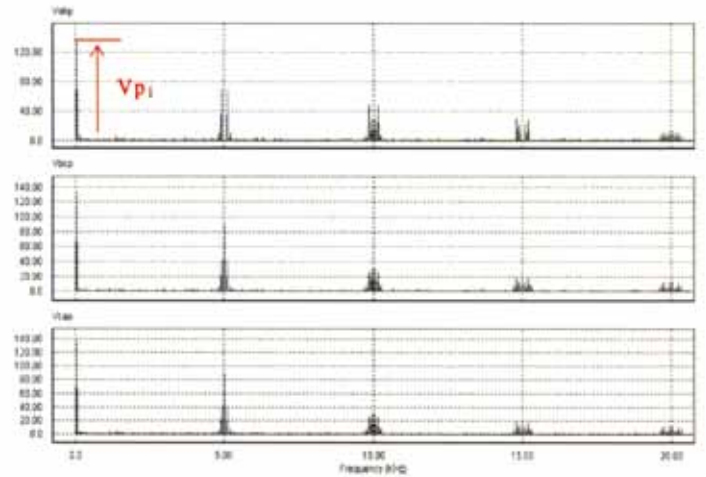


Fig. 7 Three phase line to line voltage spectrums

Table 2 Results of simulation

| | | V_{rms} [V] | V_1 [V] | U [%] |
|----------------------|----------|---------------|-----------|---------|
| Line to line voltage | V_{ab} | 153.4 | 95.25 | 47.62 |
| | V_{bc} | 139.3 | 94.20 | 47.10 |
| | V_{ca} | 140.6 | 96.07 | 48.04 |

4. 2 相インバータによる 3 相モータ駆動実験

4.1 実験装置

Fig. 8 に実験回路を示す．この回路において 3 相インバータとする場合は c 相を①へ接続し，2 相インバータの場合は②へ接続する．なお，装置の都合から 2 相インバータの c 相の回路接続は，バッテリーの中間点に代えて，大容量の 2 つのキャパシタの中性点とした．2 相インバータ及び 3 相インバータの仕様を Table 3 に示し，駆動する誘導モータの仕様を Table 4 に示す．インバータの制御は，Fig. 9 のように DSP により行う．DSP は，マイウエイ技研株式会社製 DSP ボード(MWPE3-C6713)を使用した．

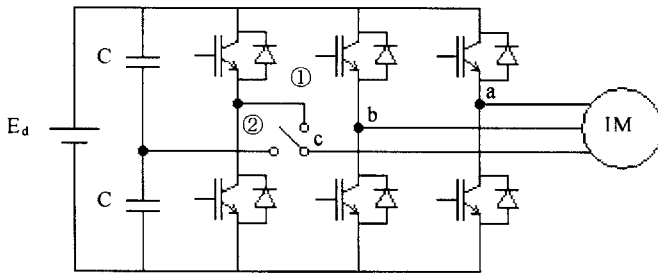


Fig. 8 Experimental circuit

Table 3 Inverter parameters for experiment

| Sign | Name | Value |
|-------|-------------------|--------------|
| E_d | DC voltage | 283V |
| C | Capacitors | 8200 μ F |
| F_c | Carrier frequency | 5kHz |
| DT | Dead time | 3.5 μ s |

Table 4 Specification of induction motor

| Name | Value |
|-----------------|---------------|
| Rated power | 3 phase, 200W |
| Rated voltage | 200V |
| Rated current | 1.1A |
| Number of poles | 4 poles |
| Rated torque | 1.49Nm |
| Rated frequency | 50Hz |

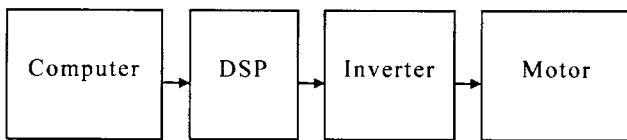


Fig. 9 Control system

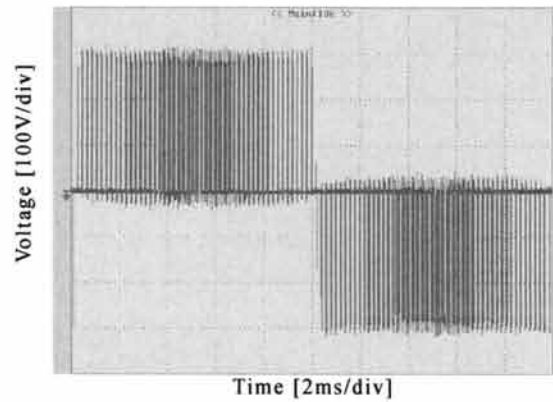
4.2 実験結果

駆動実験の運転周波数を 50Hz とし、誘導モータに負荷を接続して駆動させたときの線電流と線間電圧を測定した。測定は 3 電圧・3 電流計法で測定した。実効値と基本波実効値を Table 5 に示す。電圧波形と電流波形を Fig. 10 に示す。電圧波形が各相で異なっていることがわかる。一方、電流波形は 3 相平衡となっている。

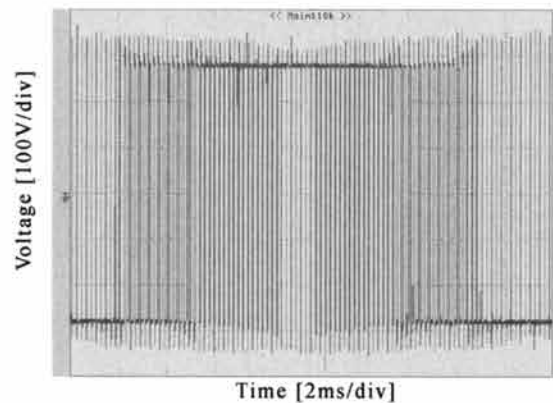
電圧・電流のスペクトルを Fig. 11 に示す。電圧の基本波成分は 3 相ともほぼ同じ波高値であるが、高調波成分は ab 相のみ異なっている。電流については、ほぼ正弦波のため、基本波成分のみ観察でき、高調波成分が非常に小さい。

このことから、3 相電圧実効値は不平衡であるのにも関わらず、基本波成分が平衡なので、3 相電流は平衡となることがわかる。

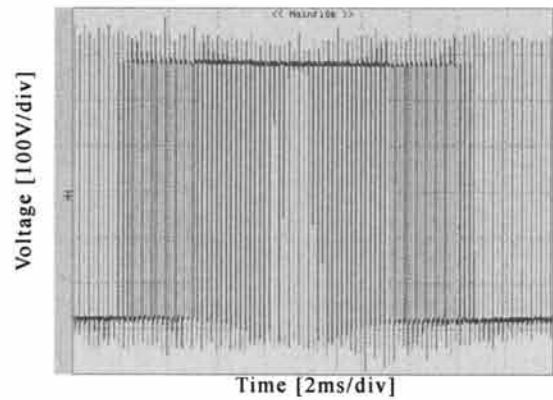
トルク発生に関係する基本波が平衡なので、3 相のモータトルクの発生は可能である。しかし、電圧利用率が低いので、入力電圧に対し基本波が低く、発生で



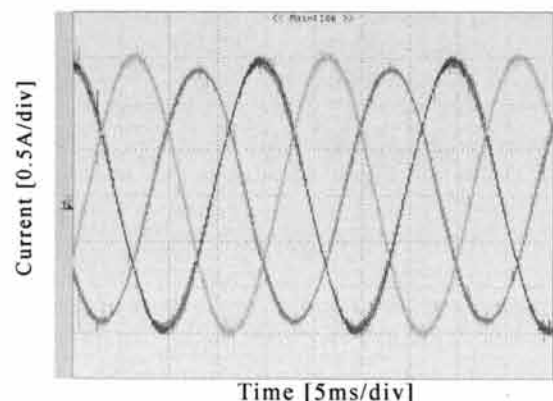
(a) V_{ab}



(b) V_{bc}



(c) V_{ca}



(d) Three line currents

Fig. 10 Line to line voltage and three line currents waveforms

きる最大トルクが低下する。また、実効値は高調波損失に関係するので、その不平衡による損失の増加の可能性について検討する必要がある。

Table 5 Results of experiment

| | | RMS value | Fundamental value |
|-------------------------|-----------------|-----------|-------------------|
| Line to line Voltage[V] | V _{ab} | 150.4 | 89.10 |
| | V _{bc} | 141.0 | 91.35 |
| | V _{ca} | 141.2 | 93.06 |
| Line current[A] | I _a | 1.09 | 1.04 |
| | I _b | 1.01 | 0.969 |
| | I _c | 1.09 | 1.06 |

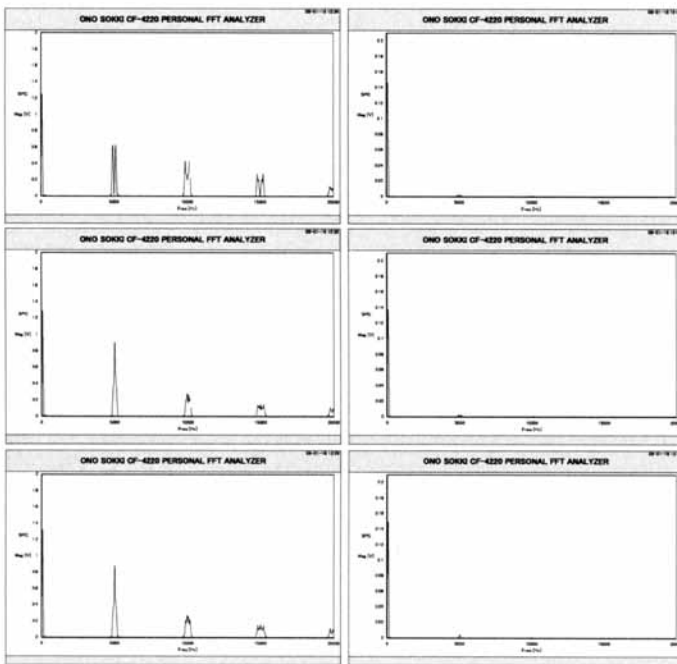


Fig. 11 Line to line voltage and line current spectrums

5. 応急運転時のモータの性能

電圧利用率の低下、電圧実効値の不平衡などがモータ性能にどのように影響するかを実験により検討した。

5.1 トルク特性

Fig. 12 に 2 相インバータ駆動時の誘導モータの発生可能な最大トルクを示す。なお、比較のため 3 相インバータ駆動時の結果も併せて示す。この結果より以下のことがわかる。

[1] 始動および低速時は同等のトルクが得られる。これは車の走行及び加速性能が同じというを示す。

- [2] 最大トルクが発生可能な最大回転数が約 40%となる。これは最大出力が低下することを示し、中速域での車の加速力が低下することを示す。
- [3] 最大回転数は約 40%に低下する。これは車の最高速度が低下することを示す。

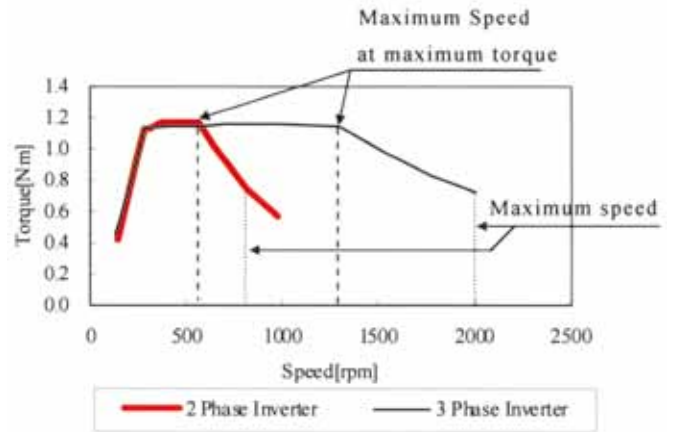


Fig. 12 Characteristic of torque

以上示したように、2 相インバータで電気自動車のモータを駆動すると、最高速度が制約され、さらに最大加速力も低下する。しかし、制約はあるものの応急運転としては利用可能な性能と考えられる。

5.2 モータの効率

モータ性能の評価として、効率を測定した。広い運転範囲でのモータ効率を表すために等効率線図を作成した。Fig. 13 に 3 相インバータ駆動時の誘導モータの等効率線図を示し、Fig. 14 に 2 相インバータ駆動時の等効率線図を示す。効率の分布は類似している。同一トルク・回転数の運転点では、3 相インバータ駆動時と 2 相インバータ駆動時で効率はほぼ同じである。また、最大効率は 3 相インバータ駆動時の 76.3%に対して、2 相インバータ駆動時は 68.8%となる。これは、3 相インバータで最大効率の点が、2 相インバータの運転範囲から外れていることによるものである。なお、運転領域全体では効率がほぼ同じであるので 2 相インバータ駆動ではモータの発熱に関して大きな問題は無いと考えられる。

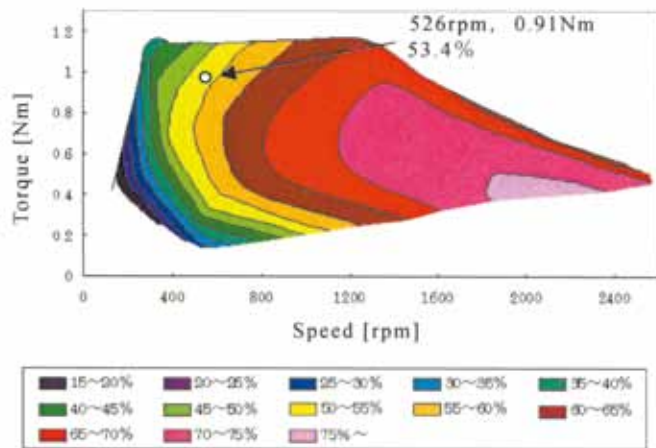


Fig. 13 Efficiency map of motor supplied by three phase inverter

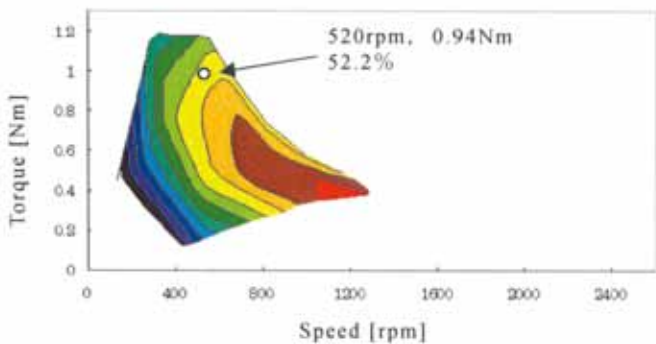


Fig. 14 Efficiency map of motor supplied by two phase inverter

6. まとめ

電気自動車の応急運転を 2 相インバータにより行う方法について検討した。その結果次のことがいえる。

- [1] 2 相インバータで 3 相電圧を発生できる。
- [2] 基本波が平衡なので、モータ駆動が可能である。
- [3] モータ効率は 3 相インバータ駆動時とほぼ同じである。

しかし、

- [4] 2 相インバータは電圧利用率が低いので、モータの最大出力、最大回転数が低下する。

以上をまとめると、3 相インバータ故障時に 2 相インバータで電気自動車のモータを駆動すると、最高速度が制約され、さらに最大加速力も低下する。しかし、制約はあるものの応急運転としては利用可能な性能と考えられる。

今後の課題として、実効値電圧の不平衡によるモータトルクリップルの確認及びモータの損失の不平衡を明らかにする必要がある。さらに、自動車用としては、ベクトル制御により 2 相インバータでト

ルク制御を行う必要がある。ベクトル制御を行うことで、本手法は誘導モータだけでなく、永久磁石同期モータにも適用可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 三菱自動車工業株式会社ホームページ
<http://www.mitsubishi-motors.co.jp/>
- 2) Gi-Taek Kim, Thomas A. Lipo : VSI-PWM Rectifier/Inverter System with a Reduced Switch Count, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, pp. 1331-1337, (1996)
- 3) 大和正典, 佐藤之彦: インバータ故障時における誘導電動機応急運転の検討, 電気学会論文誌D, 第 123-D 巻, 12 号, pp.1430-1437, (2003)
- 4) Jangjaempradit Saksit, 鍋島幸生, 早瀬勇佑, 森本雅之: 2 相インバータによる 3 相誘導電動機の駆動, 平成 19 年電気学会全国大会, 4-161, pp.269-270 (2007)
- 5) Saksit Jangjaempradit, Masayuki Morimoto : Two Phase Inverter Drive of Three Phase Motor, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.1492-1495 (2007)
- 6) 石川智朗, 森本雅之: EV 用 2 相インバータによる 3 相モータの駆動, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会, P1-3, 1-113, (2008)
- 7) インバータドライブハンドブック編集委員会編, インバータドライブハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.467, (1995)