

# EVパワートレイン用小型48Vモータ巻線構造

田中 大貴\* 諏訪林 明\* 朝間 淳一\*\*

## 抄 録

近年のカーボンニュートラルへの取り組みにより、車両の電動化の必要性が高まっている。同時に、電動車両のコスト上昇も抑えなければならない。

コスト削減のために低電圧システムを考慮すると、目標の出力を達成するには大電流が必要になる。大電力・低電圧システムを実現するため、48Vシステムを例に検討した。

ただし、低電圧方式のため、モータの高出力化に必要な大電流に対応できるモータの巻線構造には十分な注意が必要である。今回の開発プロジェクトでは、トランスミッションと組み合わせてモータ並列巻線構造を採用し、十分な抑制効果を発揮し、モータの大型化を抑制することにより車両への搭載を可能にした。

本稿では、モータの並列巻線構造を実現するために適用した技術について説明する。

## 1. 目的

近年のカーボンニュートラルへの取り組みにより、車両の電動化の必要性が高まっている。同時に、電動車両のコスト上昇も抑えなければならない。その手段の一つが、比較的 low コストで導入できる48Vシステムの採用である。ただし、48V系は電圧が低いため、モータの高出力化に必要な大電流に対応できるモータ巻線構造が必要となる。今回の開発では、トランスミッションと組み合わせてモータ並列巻線構造を採用することで、モータの大型化を十分に抑えて搭載を可能にした。

本稿では、モータの並列巻線構造を実現するために適用した技術について説明する。

## 2. 開発のねらい

今回開発するモータは小型車両への搭載を想定している。

従来の小型車と同等の出力を目標に、高回転モータを採用することでさらなるコンパクト化を実現した。

そこで、モータとインバータに要求される性能値を次のように定義した。

- 48V電源採用
- 最大インバータ電流905Arms
- ダブルスター結線を採用、スター結線あたりの最大相電流は452Arms
- モータ出力32kW以上
- モータ最高速度20,000rpm
- 目標モータトルク32Nm

### 2.1 取り組むべき技術課題とその解決策

上記の性能要件を達成するには、モータを開発する際に次の課題に対処する必要があった。

(1)モータの高出力化に伴う電流増加に対応してモータコイルの電流密度を維持するには、コイル断面積を大きくし、スロット面積も大きくする必要があった。その場合、ステータ容積も大きくなり、車両への搭載性が悪化してしまう。さらに、固定子の体積を同じに保ちながら電流密度を増加させると、発熱が大きくなり、熱性能が低下する。

このプロジェクトでは、車両への搭載性の要件からモータのサイズを維持する必要があった。そのため、電流密度を従来と同じに保ちながら、単位面積あたりに流れる電流を抑える方法が必要であった。

(2)モータは小型かつ高速に設計されているため、高速域で駆動すると鉄損が大きくなる懸念があった。また、モータはコンパクトな設計のため熱容量が小さいため、温度が急激に上昇する可能性が懸念されていた。

## 2.2 技術課題を解決するための巻線仕様の選定

### 2.2.1 モータ巻線のターン数の定義

今回のプロジェクトでは、以前に開発した高出力モータをベースに巻線仕様を検討した。このモータを2ターン仕様にする、低速運転時にバッテリー電圧を超える誘起電圧が発生し、必要な出力が得られなかった。一方、1ターン仕様では最大電流が1,000Armsを超え、今回のモータとしては許容できない電流値であった。

そこで中間の1.5ターン仕様を検討した。必要なモータ出力は得られたが、1.5ターン仕様のコイル配置によりスロット内のコイル充填率にばらつきが発生した。したがって、4つの1.5ターン巻線を直列に接続し、2つの3ターン巻線を直列に接続したダブルスター接続に変更した。

ダブルスター結線の採用により、スター結線1個あたりの目標出力を16kWとし、電流密度を抑えながら目標のモータ出力32kWを達成することができた (Fig. 1)。

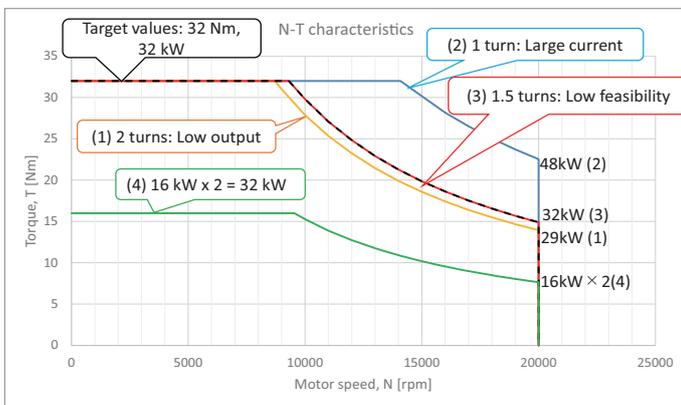


Fig. 1 Relationship between number of winding turns and motor output

### 2.2.2 高速域での鉄損対策

二層短節巻を採用し、高速域での鉄損を低減した。短節分布巻のメリットとして、誘起電圧がより正弦波に近い波形となる。その結果、高調波成分の低減につながり、鉄損の低減につながる。また、コイルピッチを短くすることで銅線の長さも短くなり、銅損の低減も期待できる。

このプロジェクトでは短節巻と二層巻の仕様を組み合わせることで、コイル周長がさらに短くなり、銅損がさらに低減された。

## 3. 平行巻構造の課題とその解決策

この章では、ダブルスター接続の二層、全節線、3ターン巻線について検討する。ターン数が奇数のため、2ターンスロットと1ターンスロットに分かれている。1スロットに3ターンまでしか巻けないため、ダブルスター結線間の同相スロットに2ターンと1ターン、または1ターンと2ターンの組み合わせでコイルを挿入する。起磁力の分布はスロット内のコイルの巻き数に比例するため、最大値は2ターンのコイルのスロット間で発生する。

Fig. 2に示すように、V相を基準に比較すると、v1巻線とv2巻線の2ターンコイルのスロットが異なるため、起磁力分布に位相差が生じる。

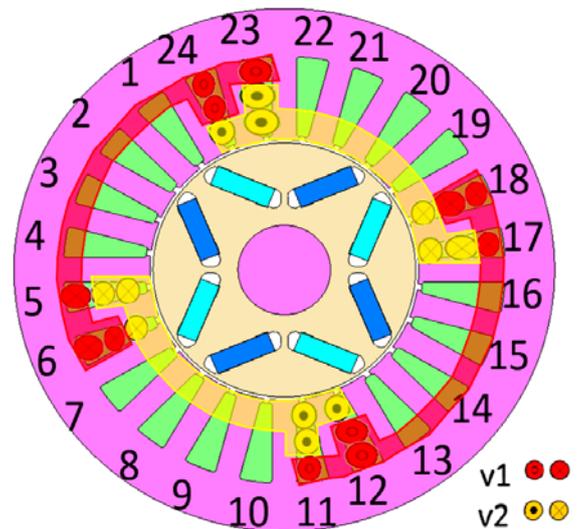
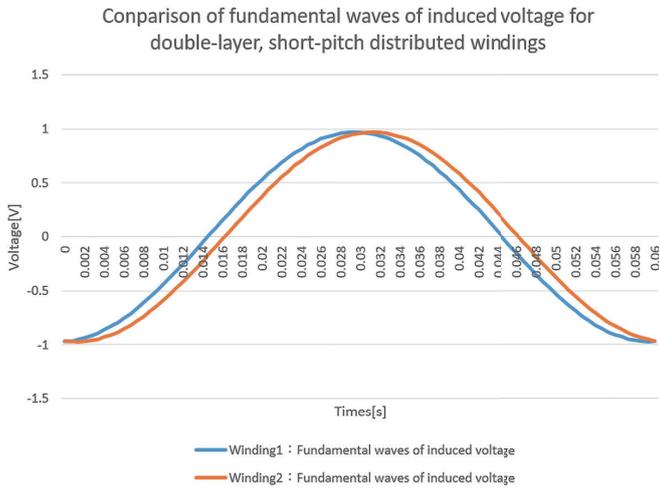


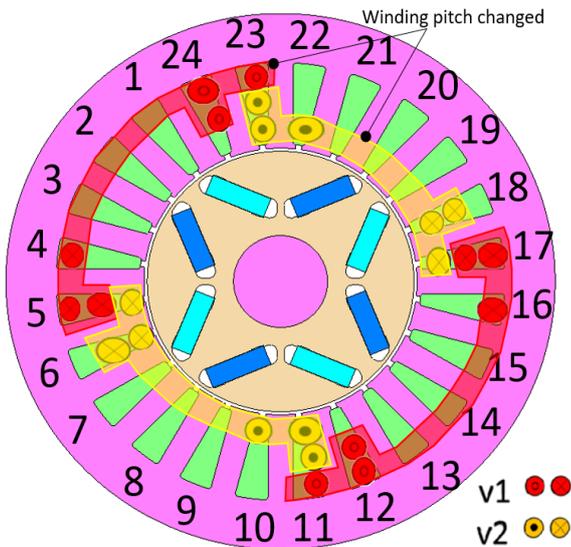
Fig. 2 Winding diagram for double-layer, full-pitch distributed windings

その結果, Fig. 3に示すような1スロット分の位相がずれた誘起電圧波形が発生する. v1巻線が発生する磁束とv2巻線が発生する磁束には位相差が生じ, モータ制御時に相互に磁気干渉が発生する可能性がある. それを防ぐ対策として, ダブルスター結線間のv1巻線とv2巻線の誘起電圧波形が同位相になるようにする必要がある.



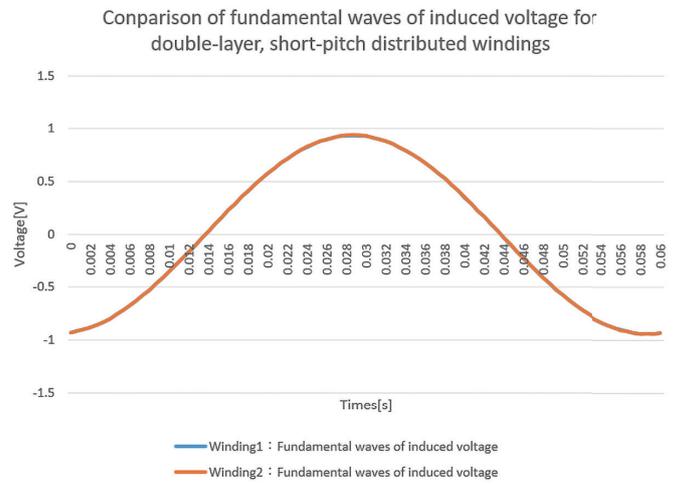
**Fig. 3 U-phase induced voltage waveforms for double-layer, full-pitch distributed windings**

今回は短節巻を採用し, 巻線配置を変更し, コイルピッチを短くする巻線方法を採用した. その結果, v1巻線の2ターンと1ターンの配置位置に対して, v2巻線は電気角 $180^\circ$ 位ずれて6スロットずらした位置に同様に配置した. その結果, 各相の誘起電圧は同一の位相が得られた (Fig. 4).



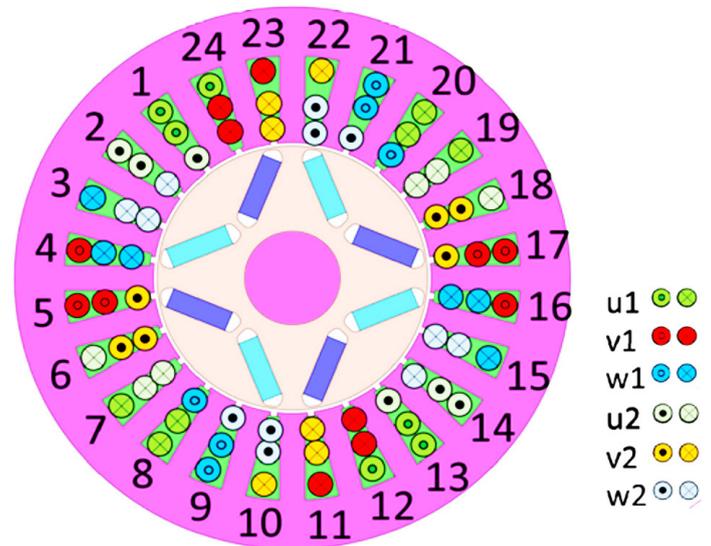
**Fig. 4 Winding diagram for double-layer, short-pitch distributed windings**

Fig. 5に示すように, ここで説明した巻線の変更により, v1巻線と v2巻線の誘導電圧を同じ位相にすることが可能になった.



**Fig. 5 U-phase induced voltage waveforms for double-layer, short-pitch distributed windings**

最終的なコイル配置をFig. 6に示す. ダブルスター結線におけるU相, W相のコイルの配置も, 前述のV相コイルの配置と同様の位置関係となる. このコイル配置により, 誘起電圧の位相差なく配置できた.



**Fig. 6 Final winding arrangement**

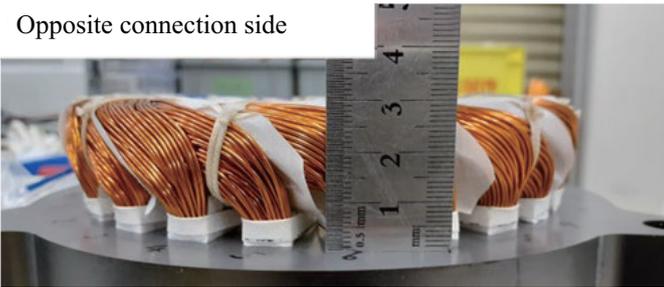
## 4. 結果

モータを製作し、性能、電気的特性を確認した。Fig. 7にモータコイルの外観を示す。

Shape of coil end



Opposite connection side



Connection side

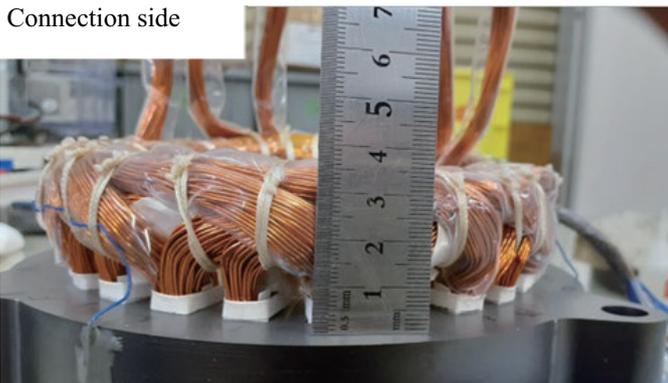


Fig. 7 Photos of windings (appearance/opposite the connection side/connection side)

今回検討したコイル配置に従ってコイルを製作し、二層重ね巻きを採用することでコイルエンドを小型化した。

製造仕様では、 $17.7\text{Arms}/\text{mm}^2$  の電流密度が得られた。

モータの誘起電圧波形を測定した結果をFig. 8に示す。図に示すように、ダブルスター結線ではU-V線間電圧に位相差がないことが確認できた。

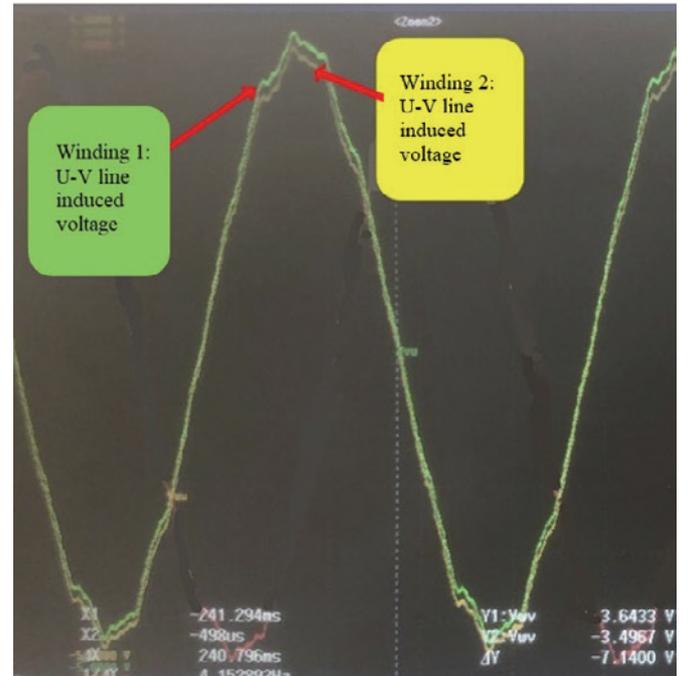


Fig. 8 Measured induced voltage waveforms

Fig. 9にモータの出力トルクの測定結果を示す。モータはほぼ意図したとおりの出力トルクを発生した。インバータとの詳細適合を行っていない為3,000rpm付近にてトルクが落ちているが、最大トルク領域である為、適合を実施すれば狙い通りの出力が達成できる見込みである。

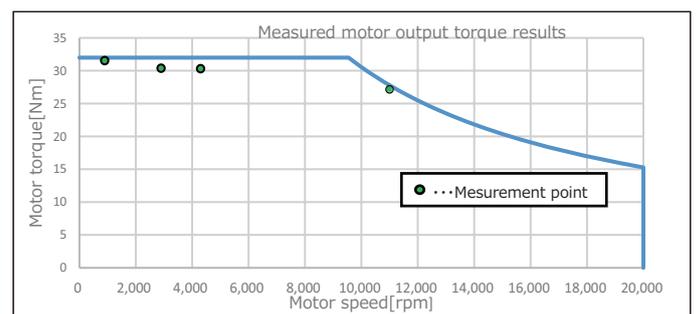


Fig. 9 Measured motor output results Measurement point

シミュレーションの結果、磁気回路にモータのさらなる出力に対する余裕があることが分かった。残留磁束密度の高い永久磁石の採用により、Fig. 10に示すように、モータの出力は最大42kW、トルクは最大41Nmが期待できる。

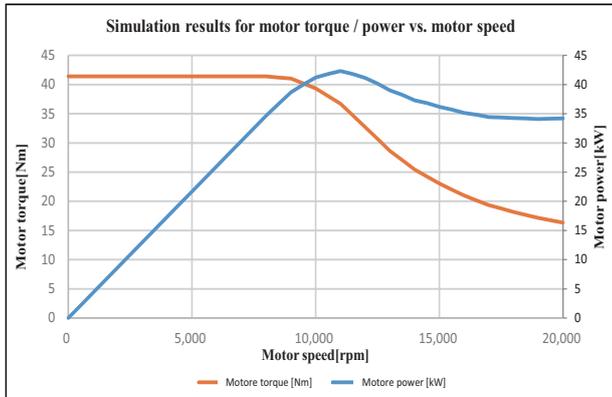


Fig.10 Simulation results for motor torque/power vs. motor speed

鉄損と銅損のシミュレーション結果をFig. 11に示す。このモータは高速域での鉄損低減を目的として短節巻を採用した。その結果、シミュレーションにおける鉄損は全節巻と比較して約22%低減された。

一方、低速高トルク領域では短節巻の採用によるトルク定数の低下により、銅損が7%程度悪化することが予想される。高速域での鉄損の低減により銅損値も約35%低減した。これは、必要なトルクを出す為に必要な電流が小さくなった為と考えている。

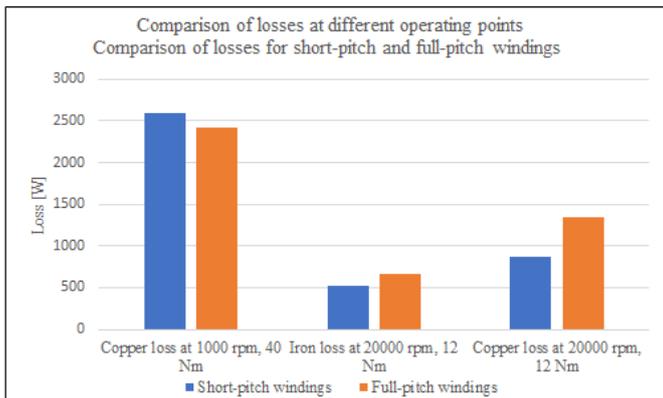


Fig.11 Comparison of losses at different operating points

新開発モータを搭載した試作車両による走行試験を実施した。得られる駆動力と車速の関係をFig. 12に示す。その結果、車両が満足のいく性能を発揮することが確認された。

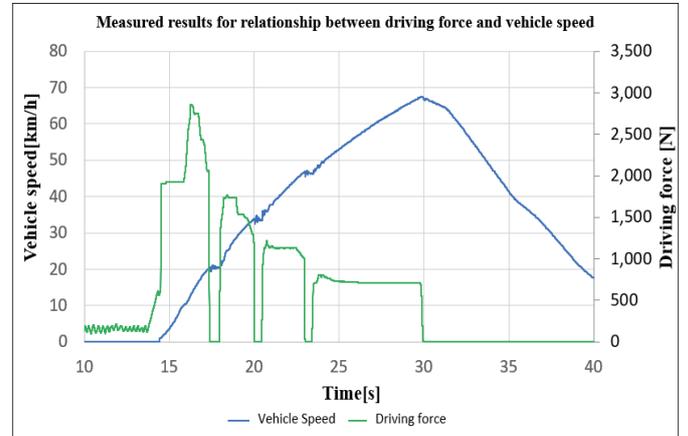


Fig. 12 Measured results for driving force vs. vehicle speed

## 5. 最後に

48Vシステムで高いモータ出力を得ることは難しいとされてきた。しかし、今回はモータの並列巻線構造を採用することでモータの大型化を抑制し、システムの小型化と小型車両への搭載を実現した (Fig. 13)。



Fig. 13 Photo of prototype demonstration vehicle

今回紹介した技術により、高速化による鉄損増加の課題と、モータの低電圧・高出力化による大電流化の課題の両方が解決されることが確認された。

48Vシステムに限定されず、他の電圧レベルでも同じ技術を使用してモータ出力の増加を得ることができる。したがって、本技術は小型化やコスト、資源の削減に貢献出来ると考えている。

## 6. 参考文献

- (1)松森 宏明 EV 駆動システム E-AXLE から見る電気・機械技術 日本機械学会誌 VOL.30 NO.1 (2022)
- (2)日経クロステック「EV軽トラ」は48V駆動で、ヴァレオと群馬大学が4WD試作車, <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00121/>
- (3)Car Watch ヴアレオ, [超小型電気自動車「48V 軽 e-シティーカー」を「人とくるまのテクノロジー展 2022 横浜」でジャパンプレミア
- (4)ポッシュがCATLと長期的協力, 新車の20%に増える48Vハイブリッドに備える, <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1909/06/news041.html>
- (5)Daiki TANAKA, Akira SUWABAYASHI, Junichi ASAMA: Downsized 48V Motor Winding Structure for an EV Powertrain, EVTeC2023.

### ■ 著者 ■



田中 大貴



諏訪林 明



朝間 淳一