- 修士論文 -

IPMSM 駆動電気自動車の トルク垂下特性改善による 粘着性能向上に関する研究

- 実車実験による検証とdq軸電流制御系への拡張 -

Study on Adhesion Characteristic Improvement of EVs driven by IPMSM based on Torque Reduction Characteristic

- Experimental Verification and Application of dq-axis Current Control -

平成21年2月4日提出

指導教員: 堀 洋一 教授

東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

76414 佐竹 正光

内容梗概

従来、EV に搭載された電気モータには強力なフィードバック電流制御が施されている が、これはスリップ発生時にもトルクを一定に保つため、スリップを助長してしまう。こ れに対して、本研究では電流制御系を改善し、スリップ発生時にはトルクが急激に減少す るようなトルク垂下特性を持たせることで、スリップ抑制を実現する手法を提案している。 本論文では、トルク垂下特性を生かしたスリップ抑制制御を実現し、外乱オブザーバや フィードバック電流制御器を付加することで、トルク垂下現象とそれによるスリップ抑制 効果の調整を行い、さらに、この垂下特性を、*dq* 両軸の電流制御系に適用することで、将 来の電気自動車駆動モータとして有望視されるリラクタンストルク併用型モータにおいて より効果的なスリップ抑制法を提案する。

そして各制御手法について、実際に電気自動車を用いた、すべりやすい路面上での走行 実験を行うことで、その有効性を検証した。

目 次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成	3
第2章	車両運動とスリップ現象	4
2.1	車両の1次元運動	4
2.2	スリップ抑制の必要性	6
2.3	実験車両 C-COMS2	6
2.4	タイヤ空気圧の違いによるスリップと燃費の検討	8
	2.4.1 燃費の比較	8
	2.4.2 すべりやすさの比較	9
<i>6</i>		
第3章	トルク垂ト特性改善による	
0.1	電気目動単のスリッノ抑制制御	15
3.1	DC モーダの回路方程式とトルク・速度起電力 ····································	15
3.2	DC モーダのトルク 垂 ト 特性	15
3.3 0.4		10 10
3.4		10
3.5	FB,FF 電流制御のトルク垂下特性とスリック抑制効果の比較 · · · · · · · ·	17
第4章	トルク垂下特性の調整法と	
	スリップ抑制効果への影響	19
4.1	実験条件....................................	19
4.2	FF+FB 制御によるトルク (電流) 垂下特性の調整	20
	4.2.1 比例ゲイン K _p によるトルク (電流) 垂下特性調整の実験	20
	4.2.2 積分ゲイン K _i によるトルク (電流) 垂下特性調整の実験	20
4.3	FF+DOB 制御によるトルク (電流) 垂下特性の調整	23
	4.3.1 外乱オブザーバゲイン K によるトルク (電流) 垂下特性調整の実験	23
	4.3.2 外乱オブザーバ時定数 $ au$ によるトルク(電流)垂下特性調整の実験	23
4.4	トルク垂下特性調整によるスリップ抑制効果への影響.........	26
第5章	${f IPMSM}$ の dq 軸電流をともに利用したトルク垂下特性改善による	
	スリップ抑制制御	27
5.1	IPMSM の回路方程式とトルク式	27

	5.2	IPMSM におけるトルク垂下特性改善によるスリップ抑制制御の実現	28
	5.3	<i>dq</i> 各軸電流垂下のトルク垂下特性への影響	29
	5.4	FF+DOB 制御による d 軸電流垂下特性の調整	35
<i>~~</i>		/++*	
第	6草	結論	38
	6.1	本論文のまとめ...................................	38
	6.2	今後の課題	39
謝	辞		40
参	考文南	Ŕ	41
発	表文南	Ŕ	43
付	録A	C-COMS2 試乗対応用資料	44
	A.1	コムスの起動	44
	A.2	コムスの充電	46
	A.3	C-COMS2 諸元 ^[18]	46
		A.3.1 電気二重層キャパシタと二次電池の比較	47
		A.3.2 C-COMS2の総合効率	47

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、電気自動車の実用化に向けた動きが活発化してきており、いよいよ 2009 年は電気 自動車元年になるとも言われている^[1]。

それでは、なぜ電気自動車が求められるのか?その理由の一つとして環境性能の良さが ある。Well to Wheel (燃料の生産,供給から自動車使用に至るまでの全過程)での1km 走 行に必要なエネルギー量(図1.1)を比較すると、他社種に比べて電気自動車が最も優れてい る。これは発電所の発電効率、電気自動車への充電効率、電池からモータへの電気自動車

	1km走行当り一次エネルギ投入量	(10・15モード)
—————————————————————————————————————	0 1	2 単位:MJ/km 3
ガソリン		2.7
ガソリンHV	1.7	
ディーゼル		2.0
ディーゼルHV	1.2	
CNG		2.7
FCV	1.5	
BEV	0.94	

図 1.1: Well to Wheel エネルギー投入量 (電力構成:日本の平均電源構成)^[4]

声 五 廷 邾	1km走行当りCO2総排出量(10・15モード)				
——甲间裡類	0	50	100		-CO2/km 200
ガソリン					193
ガソリンHV			123		
ディーゼル				146	
ディーゼルHV			89.4		
CNG				148	
FCV		86	6.8		
BEV		49.0			

図 1.2: Well to Wheel CO₂ 総排出量 (電力構成:日本の平均電源構成)^[4]

の車両効率のどれもが高効率なために、総合エネルギー効率が高くなっている。また、走行中の電気自動車は排出ガスを全く排出しないが、Well to Wheel での CO₂ 総排出量 (図 1.2)を比較しても、電気自動車は他社種に比べて排出量は最も少ない。このような環境性能から、電気自動車は究極のエコカーとも言われている。さらに、電気は社会における基本のエネルギー形態となっており、多種多様なエネルギー源からの発電も可能で、エネルギーの多様化にも対応できる。

このように、電気自動車は環境的な視点から注目されがちであるが、その駆動源をモー タとすることで、内燃機関式自動車にはない次のような優位点を持つ^[6]。

- モータのトルク応答が高速かつ正確
 モータのトルク応答速度は数 ms であり、エンジンの 10~100 倍高速である。電気自動車では応答速度の速さを利用した高度な制御が可能になる。
- 発生トルクを正確に把握できる
 電気モータは電流を観測すれば、発生トルクをリアルタイムで把握できる。これによって、タイヤ-路面間に生じる駆動力,制動力が容易に推定でき、路面状態推定に利用できる。
- モータを各輪に分散配置できるエンジンに比べて軽量で小型なモータは、各車輪ごとに独立駆動するモータを搭載することも可能である。各輪の駆動力差を利用した車体制御が実現できる。

なかでもトルク応答性の良さは、車輪の空転防止制御,粘着制御に生かされると考えられ、 すでに多くの研究が行われている^{[7][8][9][10]}。車輪空転現象は、車輪慣性が車両重量に対し軽 い事に起因して、自動車の中でも特に時定数が小さい現象である。そのため、モータの応 答の速さを活かす最適な対象の一つと考えられる。

1.2 研究の目的

電気モータの電流制御には、一般にフィードバック電流制御が適用されている。しかし このフィードバック制御では、トルクは常に指令値どおりに保たれるため、車輪がスリッ プした場合には大空転を起こしてしまう。本来、スリップを抑えるためにはスリップ発生 時にトルクを減少させなくてはならない。そのため、フィードバック制御を前提としたこ れまでの空転防止制御では、電流制御系の外側にスリップ抑制器を設け、スリップ発生時 にはトルク(電流)指令を減少させるような仕組みをとっていた。

これに対して本研究では、電気モータの電流制御系そのものを改善し、電圧源によって 駆動される電気モータが本来もっているトルク垂下特性(すなわち微小なスリップに対しト ルクが急峻に減少する)を生かした電流制御系を実現し、スリップ時のモータ速度の増加を 抑制する手法を提案する。また、外乱オブザーバやフィードバック電流制御器を付加する ことで、トルク垂下現象とそれによるスリップ抑制効果の調整を行う。さらに、この垂下特 性を、*dq* 両軸の電流制御系に適用することで、将来の電気自動車駆動モータとして有望視 されるリラクタンストルク併用型モータにおいてより効果的なスリップ抑制法を提案する。

そして、実際に電気自動車を用いて、すべりやすい路面上での走行実験を行い、各制御手法の効果を検証する。

1.3 本論文の構成

まず本章では、本研究の背景および目的について述べた。第2章では自動車の運動方程 式とスリップ現象、および実験車両を紹介し、タイヤ空気圧変化時の燃費とすべりやすさ の違いを観察する。第3章で電気モータのトルク垂下特性およびこの特性を利用したスリッ プ抑制制御について述べ、従来法との比較からその効果を確認する。第4章ではトルク垂 下特性の調整法を示し、実験によってパラメータ調整時の効果を確かめる。第5章では垂 下特性を IPMSM の *dq* 軸電流制御系へ応用した手法を提案し、実験結果より有効性を検証 する。そして、第6章にて結言として本論文のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 車両運動とスリップ現象

2.1 車両の1次元運動

車両の運動を前後方向のみに限定し、モータ時定数,走行抵抗がともに十分小さいと仮定 すると、車両に働く力は図2.1のようになり、運動方程式は以下のように表現することがで きる。

$$J_{\omega}\dot{\omega} = T - rF_d \tag{2.1}$$

$$\dot{MV} = F_d - F_{dr} \tag{2.2}$$

$$V_{\omega} = r\omega \tag{2.3}$$

ここで各変数は、モータ回転速度 ω ,車体速度V,車輪速度 $V_{\omega} = r\omega$,モータトルクT,駆動 力 F_d ,走行抵抗 F_{dr} とする。各定数は、車輪慣性モーメント J_{ω} ,車体重量M,タイヤ半径rである。

タイヤ-路面間の粘着特性はスリップ率の概念で表現する事ができる。スリップ率 λ は以下の式で定義される。

$$\lambda = \frac{V_{\omega} - V}{\max(V_{\omega}, V)} \tag{2.4}$$

スリップ率 λ を用いると、タイヤ-路面間の摩擦係数 μ の関係 ($\mu - \lambda$ 曲線) は図 2.2 のよう に表される。摩擦係数つまり路面から車両への駆動力の伝達特性が一定ではなく、すべり 具合によって変化する事を表している。

また、駆動力 F_d は垂直抗力 N と摩擦係数 μ から次式で得られる。

$$F_d = \mu(\lambda)N\tag{2.5}$$



図 2.1: 車両の運動



図 2.2: $\mu - \lambda$ 曲線

この駆動力は車輪と接触面の間に微小な速度の差,スリップが生じることで発生する。タイヤ-路面間の摩擦係数 μ は、図2.2のような路面摩擦関数($\mu - \lambda$ 曲線)に依存する。ただし、この路面摩擦関数は路面状態により変化するため、駆動輪の出し得る最大駆動力を決定する μ の極大値(最大摩擦係数)とそのときのスリップ率(最適スリップ率)は一意に定まらない。

ドライバがアクセルペダルを踏み込みモータトルク*T*が急増すると、これに伴い(2.1),(2.3)式より車輪速度 V_{ω} が増加、加速時においてこれは(2.4)式からスリップ率の増加となる。こ のとき、 $\lambda \simeq 0$ 付近ではスリップ率の増加は図 2.2のように駆動力を増加させる。これは車体 を加速する一方、車輪には減速方向に作用することになり、やがてモータトルク*T*と駆動 力 F_d は平衡し、車輪加速は収まる。

しかし、スリップ率が大きくなり最適スリップ率を超えると、このようないわば負帰還 の作用が失われる。スリップ率の増加に伴って駆動力は減衰し、駆動力を超えた分のトル クにより車輪は加速され続け、これによりスリップ率が増加してまた駆動力が減少すると いう悪循環に陥る。こうしてスリップ率が発散し大空転に陥る。

式(1)~(4)をそれぞれ整理すると、以下の式を得ることができる。

$$\dot{\omega} = \frac{T - rF_{dr} + r^2 M \omega \dot{\lambda}}{J_{\omega} + r^2 M (1 - \lambda)}$$
(2.6)

さらに、走行抵抗は無視できるほど微小 $(F_{dr} \simeq 0)$ かつスリップ率が変動しない定常状態を 仮定すると、モータから見た車両モデルの伝達関数 ω/T は次式で近似できる。

$$\frac{\omega}{T} \simeq \frac{1}{\{J_{\omega} + r^2 M(1-\lambda)\}s} = \frac{1}{J(\lambda)s}$$
(2.7)

$$J(\lambda) = \{J_{\omega} + r^2 M(1-\lambda)\}$$
(2.8)

 $J(\lambda)$ は車輪と車体を合わせて換算した慣性モーメントであり、これはスリップ率の関数で ある。この式から、スリップ率が上昇すると $J(\lambda)$ は減少することがわかる。つまりモータ から見るとスリップという現象は、 $J(\lambda)$ が軽くなったと捉えられる。



図 2.3: 路面摩擦と横滑べり摩擦

2.2 スリップ抑制の必要性

それでは、なぜスリップを抑制する必要があるのだろうか。まず、図2.2からもわかるようにスリップ率が過大になると、タイヤと路面間の駆動力はむしろ小さくなっている。つまり、加減速性能を保つためにはスリップ率を適切に抑えてやる必要がある。

また、スリップ抑制が必要であるより重要な理由として、旋回性能の確保が挙げられる。 これは、タイヤに発生する横力は図2.3のように、スリップ率の増加に伴い単調かつ急激に 減少するためである横力が得られなくなると、左右方向の移動旋回が困難となり、大変危 険である。急制動時の空転防止制御として ABS が広く普及した理由はこの点にある。

ところで、電気自動車の欠点として一充電走行距離が短い点がよく挙げられるが、粘着 制御が上手く行えれば、この問題の解決に大きく貢献できる可能性がある。それは、低転 がり抵抗タイヤ(低燃費タイヤ)の使用が鍵となる。一充電走行距離を伸ばすためには、走 行抵抗を削減することが有効と考えられる。走行抵抗のうち、空気抵抗を抑えることも重 要だが、もともと都市内交通手段として期待される電気自動車では、転がり抵抗による損 失が支配的な低速度域での使用が多いと予想される。そのため、転がり抵抗の低減は走行 距離の延長に大きく影響する。しかし、転がり抵抗を低減することはタイヤの摩擦力を犠 牲にせざるを得なく、スリップが起こりやすくなる。この点を粘着制御で補うこと出来れ ば、超低転がり抵抗タイヤを用い一充電走行距離を改善できると考えられる。

2.3 実験車両 C-COMS2

図 2.4, 表 2.1~2.3 が本研究で実験車両として用いた"C-COMS2"の外観と駆動モータの諸元である。C-COMS2 は蓄電装置として電気二重層キャパシタ (EDLC)を用いており、30秒の充電で 20 分程走ることができる。また、DD インホイールモータを搭載、より高性能な制御や推定の実験にも適している

ベースとなっているのはトヨタ車体(株)が市販している電気自動車 COMS であり、本研 究室ではこれまでにこの C-COMS2 を用いて、エネルギー分析や車両運動制御などを行っ ている^[18]。



図 2.4: 実験車両

表 2.1: モータ諸元

駆動形式	後輪インホイールモータ×2機		
モータ種類	永久磁石同期電動機		
ギア比	ダイレクトドライブ		
最大出力	3.0 [kW]		
最大トルク	120 [Nm]		
最大回転数	600 [rpm]		

表 2.2: 電源諸元

蓄電装置	32.4V110F EDLC モジュール
搭載形式	3 並列 3 直列
電源電圧	97.2 [V]
蓄電容量	144 [Wh]

表 2.3: 車体諸元

車体寸法	$L2365 \times W995 \times H1600 \text{ [mm]}$
車両総重量	450 [kg]
車輪慣性	$0.5 \; [\rm kgm^2]$
車輪半径	0.23 [m]

2.4 タイヤ空気圧の違いによるスリップと燃費の検討

自動車の燃費を向上させる一つの方法として、走行抵抗の低減が考えられる。車が一定 速度で走る時、エネルギーのほとんどが転がり抵抗と空気抵抗を合わせた走行抵抗で消費 される^[3]。

転がり抵抗の大きさを決定する主な要因はタイヤにある。最近では、「エコタイヤ」とし て転がり抵抗を低減したタイヤが広く普及している。これらの転がり抵抗低減は、主にタ イヤ自体の真円性の追求やシリカなどの素材の配合、タイヤ自体のダイエット化により達 成することが多いようである^[11]。しかし、摩擦力を維持したまま転がり抵抗のみを削減す ることは本来構造的に困難なことである^[12]。そのため、更なる転がり抵抗の低減を目指し た場合には、限度があり、やがてはタイヤの摩擦力を犠牲にせざるを得ないと思われる。こ のように、一充電走行距離の延長とタイヤの摩擦力の確保は、一見トレードオフの関係に ある。だが、より高度な粘着制御が実現されればこれを両立できる可能性がある。このよう な状況からも、モータの高い制御性を生かした電気自動車の粘着制御に関する技術は、今 後とも注力すべき価値のある技術であるといえる。

ここでは、タイヤの摩擦力確保と転がり抵抗低減のトレードオフの関係を見るため、タ イヤの空気圧の違いによる燃費とすべりやすさの比較を行う。実験車 C-COMS2 の指定空 気圧は前輪が 1.50kgf/cm², 後輪が 1.75kgf/cm² となっている。これを指定空気圧より 30% 減圧した状態 (前輪:1.05kgf/cm², 後輪:1.225kgf/cm²) と、指定空気圧より 10% 増圧した状 態 (前輪:1.65kgf/cm², 後輪:1.925kgf/cm²) に分け、それぞれの燃費とすべりやすさの比較を 行った。

2.4.1 燃費の比較

タイヤの転がり抵抗は、接地面積が少なければ軽減される。摩擦とゴムの変形量が減る 分だけ、エネルギーのロスが少なくなるからである。つまり硬いタイヤ、空気圧が高いほ ど転がり抵抗は少なくなると考えられる。

図 2.4 の実験車両を用いて、タイヤ空気圧の違いによる燃費への影響を確認した。実験は 増圧、減圧状態それぞれについて、20 km/h, 10 km/hの定速度制御走行を行った。速度制御 状態での走行距離は約 80 m に統一し、それ以降からは惰性走行に移行している。それぞれ が等速制御中に消費したエネルギーを示した物が表 2.4 である。ここで、消費エネルギー量 は EDLC の残存エネルギー量 $(\frac{1}{2}CV^2)$ から求めた。空気圧を適正値にすることで燃費は向 上し、低速度域ではさらに省燃費化が著しい。

また、それぞれの条件で走行中の速度,走行距離,モータトルク,駆動力,EDLC電圧,EDLC 残存エネルギーの時間変化を図2.6~2.9 に示す。駆動力は式(2.1)に基づいた駆動力オブザー バ^[7]を用いて推定している。空気圧が小さいと転がり抵抗が大きくなることで惰性距離が 短くなっており、定速走行中の駆動力も転がり抵抗の差分だけ大きくなっている。

\	30% 減圧	10% 増圧	:	燃費差
速度指令 20km/h	38.9 [kJ]	$35.8 \; [kJ]$:	8 [%]
速度指令 10km/h	$29.4 \; [kJ]$	25.3 [kJ]	:	14 [%]

表 2.4:約80m 走行結果 空気圧・走行速度ごとの燃費変化

速度指令10km/hでは40s、速度指令20km/hでは26.5sから惰性走行となっているが、この時のデータを最小2乗法で整理して増圧,減圧時の走行抵抗を求めた物が図2.5である。 増圧,減圧間では空気抵抗はほとんど変化していないが、たしかに転がり抵抗が変化していることが確認できる。

2.4.2 すべりやすさの比較

図 2.10,2.11 は各タイヤ空気圧で、すべりやすい路面へと定トルク指令で進入した実験結果である。

両実験ではt=2.7s付近から低µ路へと進入している。低空気圧は空転が起きていないが、 高空気圧の方では完全にスリップしてしまっている。一方、空転前までの加速を比較する と、同トルク条件下では転がり抵抗増加の影響で低空気圧側の加速が悪くなっていること が確認できる。



図 2.5: 各タイヤ空気圧における走行抵抗



図 2.6: 空気圧を指定値より 30% 減少させたタイヤによる走行試験 (20km/h 定速度制御)



図 2.7: 空気圧を指定値より 10% 増加させたタイヤによる走行試験 (20km/h 定速度制御)



図 2.8: 空気圧を指定値より 30% 減少させたタイヤによる走行試験 (10km/h 定速度制御)



図 2.9: 空気圧を指定値より 10% 増加させたタイヤによる走行試験 (10km/h 定速度制御)



図 2.10: 空気圧を指定値より 30% 減少させたタイヤによる走行試験 (120Nm 定トルク指令)



図 2.11: 空気圧を指定値より 10% 上昇させたタイヤによる走行試験 (120Nm 定トルク指令)

第3章 トルク垂下特性改善による 電気自動車のスリップ抑制制御

3.1 DCモータの回路方程式とトルク・速度起電力

DCモータにおいて、その回路方程式、回転角速度と逆起電力の関係式、トルクと電流の 関係式は次の通りである。

$$v^* = (R + sL)i + v_{emf} \tag{3.1}$$

$$v_{emf} = \omega \varphi_f \tag{3.2}$$

$$T = i\varphi_f \tag{3.3}$$

これらの関係から、EV に搭載された電気モータのブロックは図 3.1 のように表される。それぞれ、電機子抵抗 R, 電機子インダクタンス L, 永久磁石界磁による鎖光磁束 φ_f であり、 v^* はモータへの入力電圧、i は実際のモータ電流、 i^* は電流指令値、 v_{emf} は逆起電力を表す。

3.2 DCモータのトルク垂下特性

式 (3.1)~(3.3) からトルク T を求めると次式のようになる。

$$T = \frac{\varphi_f}{R + sL} \left(v^* - \omega \varphi_f \right) \tag{3.4}$$

この関係より、定電圧で運転中においては回転速度が大きくなるに従って、トルクつまり 電流の値は直線的に減少する(図3.2)。このような特性はトルク(電流)垂下特性と呼ばれて いる。本研究では、車輪スリップの発生時、この垂下特性を制御によって実現することで スリップを抑制する手法を提案している。



図 3.1: 電気自動車に搭載された電気モータのブロック図

3.3 FB 電流制御

電気自動車に搭載された直流電動機 (DCM) に、従来手法であるフィードバック (FB) 電 流制御を施したものが図 3.3 である。ここでは、PI 制御器を用いている。この FB 制御で は、各ゲイン K_p, K_i の値を大きくし、電流センサにより測定した実際の電流 (トルク) 値を 常に指令値に追従させるように制御する。そのため、先に説明したように車輪のスリップ が生じると、慣性モーメント $J(\lambda)$ が下がったような状態になるが、それでも FB 制御器は 指令値通りに一定のトルクを発生させるように働く。トルク一定のまま慣性モーメントが 低下すると、モータ回転速度は急上昇し、結果さらなるスリップ率増加という悪循環に陥 り、大空転を起こしてしまう。

3.4 FF 電流制御

図 3.4 は、EV に搭載された DCM にフィードフォワード (FF) 電流制御を施したブロック 図である。FF 制御では、電機子の電圧降下補償分 v_{RL}^* と逆起電力補償分 v_{emf}^* 、それぞれの 和をモータの入力電圧として与える。ここでは、スリップによって変動する $J(\lambda)$ に対して、 $\lambda = 0$ におけるノミナル慣性モーメント $J_n = J(0) = J_\omega + r^2 M$ を FF 制御器に用いている。

スリップが発生した場合、車輪回転速度は急激に上昇し、回転速度に比例する逆起電力 v_{emf} も急上昇する。一方で、逆起電力補償分 v_{emf}^* は非スリップ時のノミナル慣性値に基づ いた値である。結果、実際の逆起電力はFF補償分を大きく上回ることになり、この逆起電 力分の差が生じる。ここで、モータパラメータが R, L, φ_f がノミナル値と等しければ、電 流*i*は電流指令値*i**から以下のように減少する。

$$i = i^{*} - \frac{1}{Ls + R} (v_{emf} - v_{emf}^{*})$$

= $i^{*} - \frac{\varphi_{f}^{2}}{Ls + R} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^{*}}{J_{n}s} \right)$ (3.5)

すなわち、FF電流制御を施した際の電流 (トルク) は、ほぼスリップが発生していない定常 走行時 ($\lambda \simeq 0$) では、 $J_{(\lambda)} \simeq J_n$ となるために指令通りのトルクが発生する。ところが一度ス リップが生じる ($\lambda \gg 0$) と、 $J_{(\lambda)} \ll J_n$ の関係から電流は指令値より減少する。このように、 スリップ率の増加に伴ってトルクが垂下することで、スリップの抑制が達成される。

この制御では、(6) 式より $\frac{i}{J_{(\lambda)}} - \frac{i^*}{J_n}$ が 0 になるまで、つまり車輪加速度が $\dot{\omega} = \frac{\varphi_f i^*}{J_n}$ に / ミナル化されるまでトルク (電流) 垂下が起こる。



図 3.2: 回転速度-トルク (電流)特性

3.5 FB,FF 電流制御のトルク垂下特性とスリップ抑制効果の 比較

FB,FF 両制御法についてスリップ時の応答を比較する実験を行った。実験は、一定トル ク指令 (電流指令値で 100A) で加速中に、滑りにくい路面 (乾燥アスファルト) から滑りや すい路面 (濡れたアクリル板) へ進入するというものである。各実験では、およそ t = 3s あ たりから路面状態が切り替わっている。

図 3.5(a) は従来手法である FB 電流制御による実験結果である。上が電流値とその指令 値、下が車輪速度と車体速度のグラフである。FB 電流制御がスリップ時にも指令値に基づ いて常にトルク値を一定に保つため、モータ回転速度は急上昇している。

これに対して、提案手法である FF 電流制御の実験結果を図 3.5(b) に示す。乾燥路面内で は FB 制御に比べ若干の乱れがあるものの、ほぼ指令通りのトルクが得られている。しか し、t=3s から滑りやすい路面に入り、車輪が空転し始めると、スリップ率が大きくなるに つれ電流値が減少し、結果、車輪速度の急上昇が抑えらている。この結果より、FF 制御で はトルク垂下が起こりスリップ抑制に効果があることが確認された。



図 3.3: FB 電流制御のブロック図



図 3.4: FF 電流制御のブロック図



図 3.5: トルク垂下特性を利用したスリップ抑制

第4章 トルク垂下特性の調整法と スリップ抑制効果への影響

前節では、トルク垂下特性によるスリップ抑制効果について述べた。先の FF 制御器では、 トルク垂下の特性はモータ固有のパラメータで決まっていた。ここでは FB 制御器,外乱オ ブザーバ (DOB) による垂下特性の調整法を紹介する。さらにその実験により、トルク垂下 速度の変化がスリップ抑制効果にどのような影響があるかを検討する。

4.1 実験条件

これ以降の実験結果は、すべて同様の条件下で行っている。実験は一定トルク指令で加速中に路面状態が変化するという条件で行う。

- *t* = 0: 乾燥アスファルト上にて加速開始
- *t* ≃ 2 : 低 µ 路 (散水アクリル板) へと侵入



図 4.1: 実験風景



図 4.2: 実験路面

4.2 FF+FB制御によるトルク(電流)垂下特性の調整

図 4.3 は FF 制御と FB 制御を組み合わせた FF+FB 制御のブロック図である。この制御では車輪が空転した際、FF 制御器のトルク垂下効果と FB 制御器の指令追従性それぞれの影響により、電流応答が決定される。FB 制御器 PI ゲイン K_p, K_i を変えることでトルク垂下効果を調整できる。このときの i^* から i までの伝達関数は次式となる。

$$G_{FFFB}(s) = \frac{i}{i^*} = \frac{Ls^2 + (K_p + R)s + (K_i + \frac{\varphi_f}{J_n})}{Ls^2 + (K_p + R)s + (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J_{(\lambda)}})}$$
(4.1)

4.2.1 比例ゲイン K_pによるトルク (電流) 垂下特性調整の実験

図 4.4 は $K_i = 0$ として Kp を $0 \sim 0.5$ の間で変化させた各実験結果である。実際に実験 結果を見ると、 K_p を小さくするに従って、電流の垂下が速くなっているのが確認でき、電 流垂下が速いほど、スリップ率の急上昇を抑えるのが速くなっている。 $K_i = 0$ の場合、電 流の垂下は以下のようになる。

$$i = i^* - \frac{\varphi_f^2}{Ls + (K_p + R)} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^*}{J_ns}\right)$$

$$(4.2)$$

この式より、トルク垂下はやはり $\dot{\omega} = \frac{\varphi_f i^*}{J_n}$ にノミナル化されるまで起こるが、 K_p が小さい ほどそれが速くなることがわかる。

4.2.2 積分ゲイン K_iによるトルク (電流) 垂下特性調整の実験

図 4.5 は $K_p = 0$ として $Ki \ge 0.2 \sim 20$ の間で変化させた各実験結果である。 $K_i = 0$ の場合、電流の垂下は以下のようになる。

$$i = i^* - \frac{1}{Ls + R} \left\{ (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J_{(\lambda)}}) \frac{i}{s} - (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J_n}) \frac{i^*}{s} \right\}$$
(4.3)



図 4.3: FF+FB 電流制御のブロック図



図 4.4: FF+FB のスリップ実験結果 (K_pの調整)



図 4.5: FF+FB のスリップ実験結果 (K_i の調整)

4.3 FF+DOB制御によるトルク(電流)垂下特性の調整

図 4.6 は FF 制御に外乱オブザーバ (DOB) を組み合わせた FF+DOB 制御のブロック図 である。これは、トルク (電流) 垂下のもととなる実際の逆起電力と FF 制御補償分の差を 外乱とみなし、外乱オブザーバで補償する形になっている。 $K や \tau$ の値により、トルク垂 下効果を調整できる。すると、次式が *i** から *i* までの伝達関数となる。

$$G_{FFDOB}(s) = \frac{i}{i^*} = \frac{L\tau s^3 + (L+R\tau)s^2 + (R+\frac{\varphi_f^2}{J_n}\tau)s + \frac{\varphi_f^2}{J_n}(1-K)}{L\tau s^3 + (L+R\tau)s^2 + (R+\frac{\varphi_f^2}{J_{(\lambda)}}\tau)s + \frac{\varphi_f^2}{J_{(\lambda)}}(1-K)}$$
(4.4)

4.3.1 外乱オブザーバゲイン K によるトルク (電流) 垂下特性調整の実験

FF+DOB について、先ほどと同様の定加速指令で走行中に路面状態が変化する実験を 行った。図 4.7 は $\tau = 0.001$ で固定し、Kをパラメータとして変化させた際の各実験結果で ある。 τ は十分に小さいので、電流垂下は次のように表すことができる。

$$i = i^* - \frac{\varphi_f^2 (1 - K)}{Ls + R} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^*}{J_n s} \right)$$
(4.5)

こちらも先の FF+FB 制御と同様に、ゲイン *K* が小さくなるにつれて、スリップ発生からの電流垂下が高速になり、やはり電流垂下が速いほど、スリップ率も抑えられている。

4.3.2 外乱オブザーバ時定数 7 によるトルク (電流) 垂下特性調整の実験

また、図 4.8 には K = 1 で固定し、 τ を変化させた実験結果を示す。外乱オブザーバの時 定数 τ が十分に小さい場合、外乱は完全に補償されてしまうのでモータの電流垂下は生じ ない。反対に、時定数 τ が大きいと、外乱抑圧応答は遅くなるので、外乱の影響が電流に 表れて垂下が発生する。 τ が大きいほどスリップ率の上昇が抑えられている。このときの、 電流垂下は次のように表すことができる。

$$i = i^* - \frac{1}{L\tau s + (L + R\tau)} \left\{ (R + \frac{\varphi_f^2 \tau}{J_{(\lambda)}}) \frac{i}{s} - (R + \frac{\varphi_f^2 \tau}{J_n}) \frac{i^*}{s} \right\}$$
(4.6)

この場合、車輪加速度は $\dot{\omega} = \frac{\varphi_f i^*}{J_n}$ にノミナル化されるのではなく、 $\dot{\omega} = \left\{ \frac{J_n R + \varphi_f^2 \tau}{J_{(\lambda)} R + \varphi_f^2 \tau} \right\} \frac{\varphi_f i^*}{J_n}$ となる。



図 4.6: FF+DOB 電流制御のブロック図



図 4.7: FF+DOB のスリップ実験結果 (Kの調整)



図 4.8: FF+DOB のスリップ実験結果 (7 の調整)

4.4 トルク垂下特性調整によるスリップ抑制効果への影響

図 4.4,4.7 の結果より、どちらの場合でもトルク垂下が高速なほど、スリップ抑制効果が 優れていることが判る。一方で、ゲインを上げ垂下速度を遅らせるにつれ、スリップ率上昇 が落ち着くまでには時間がかかり、結果的にスリップ率は高くなっている。これは、(2.8)式 のようにスリップが生じると、イナーシャJ_(λ)が軽くなり車輪速度が加速度的に上昇、これ によりさらにスリップ率が上昇、するとさらに J_(λ)が減少という悪循環に陥るからである。

そもそも、トルク垂下によるスリップ抑制制御は、スリップの発生を完全に防いだり、スリップ率を積極的に小さな値に収束させるといったものではなく、電流を $i = \frac{J_{(\lambda)}}{J_n}i^*$ に収束させ、車輪速度の変動を $\frac{\omega}{T^*} \simeq \frac{1}{J_{ns}}$ へとノミナル化することで、スリップ率上昇を遅らせるというのがその制御効果である。よって、垂下が遅れたことで上昇した分のスリップ率については、路面状態が安定して再粘着するまで残ってしまう。

つまり、スリップ抑制効果を向上させるにはトルク垂下を高速にすることが最も重要と なる。しかし、先のようにFB制御器やDOBのゲインを高くすることは垂下速度を低下さ せる。FF制御のみの場合が、基本的にトルク垂下が最も速くなるが、モータ固有パラメー タで決まる垂下速度が限界になってしまう。FF+DOBについては*K*を負にすることで、ト ルク垂下を積極的に速くできるが、これはパラメータ誤差の影響も増幅することになるの で好ましくない。

第5章 IPMSMのdq軸電流をともに利用 したトルク垂下特性改善による スリップ抑制制御

ここまでは、電気自動車に搭載されたモータを DCM に限定して説明してきた。しかし、 小型軽量化,高効率高出力化への要求により、電気自動車用モータは永久磁石を用いた同期 機の適用が一般的になりつつある。なかでも、リラクタンストルクが利用でき、弱め磁束制 御も効果的に実現できる IPMSM は、自動車への応用に適していると考えられている^{[15][16]}。

ベクトル制御は PMSM の電機子電流を 2 軸直流回転 (*dq*) 座標系で制御する方式であり、 永久磁石同期電動機の一般的な制御法として適用されている。*dq* 座標を用いると、永久磁 石同期電動機を直流電動機と同様にみなすことが可能になる。つまり、電流と電圧の制御 が回転座標系において可能となれば、永久磁石同期電動機を直流電動機と同様な制御則で 容易に扱うことが可能になる。

5.1 **IPMSM**の回路方程式とトルク式

IPMSMでは、*dq*座標系のモデルを適用するのが一般的である。これは、三相交流を*dq*座標系の状態量に変換すると直流となり、直流電動機のように界磁成分と電機子成分に分離でき、制御が容易となるためである^[17]。三相交流は、電流電圧それぞれ3つの変数を持つ。各相の電流電圧の総和がゼロである、という前提のもとでは、三変数のうち1つは従属変数となるため、二変数量に変換できる。三相交流を回転二軸量である*dq*座標系へ変換した電動機モデルの電圧方程式とトルク式は次式で与えられる。回転子の永久磁石軸方向が*d*軸、それと直交する方向が*q*軸である。



図 5.1: IPMSM のベクトル制御

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\varphi_f \end{bmatrix}$$
(5.1)

$$T = \{\varphi_f + (L_d - L_q)i_d\}i_q \tag{5.2}$$

ただし、 v_d , v_q は d, q 軸電圧、 i_d , i_q は d, q 軸電流 L_d , L_q は d, q 軸インダクタンスであり、 ω_{re} はモータの電気角速度である。(5.2) 式のモータトルクは、マグネットトルク $\varphi_f i_q$ とリラク タンストルク $(L_d - L_q)i_d i_q$ の和で決まる。電気自動車に搭載された IPMSM の dq 座標系ブ ロック図は図 5.2 のようになる。

5.2 IPMSMにおけるトルク垂下特性改善によるスリップ抑 制制御の実現

IPMSM では図のように dq 軸間で干渉しあう成分が存在する。一般には制御を容易にするため、この成分を打ち消す非干渉制御が行われる。具体的には dq 軸の入力電圧 v_d^*, v_q^* を以下のように制御することで、ブロック線が図 5.3 のように簡単化されることがわかる。

$$v_d^* = v_d' - \omega L_q i_q$$

$$v_q^* = v_q' + \omega (L_d i_d + \varphi_f)$$
(5.3)

しかし今回は、スリップ抑制制御が目的で逆起電力によりトルク垂下を起こす必要がる。 そこで、ここでは逆起電力まで非干渉化せずに、電圧を (5.4) 式のように制御する。

$$v_d^* = v_d^* - \omega L_q i_q$$
$$v_q^* = v_q^* + \omega L_d i_d \tag{5.4}$$

すると、 $v_{d}^{,v_{q}}$ を入力電圧としたブロック線図は図 5.4 のようになり、さらに $i_{d} = 0$ と 制御すれば、q 軸のブロック図が完全に図 3.1 と等価になることがわかる。

このように非干渉制御の部分を工夫することで、IPMSMもDCモータ同様に扱うことができるので、先述したようなトルク垂下によるスリップ抑制制御はIPMSMでも実現可能となる。実際に本稿で紹介した実験結果はすべてIPMSMを駆動源とする電気自動車で実験を行っている。



図 5.2: dq 座標で表した IPMSM のブロック図

5.3 dq各軸電流垂下のトルク垂下特性への影響

$$i_d = \frac{1}{L_d s + R} \left\{ v_d^* + \omega_{re}(L_q i_q) \right\}$$
(5.5)

$$i_q = \frac{1}{L_q s + R} \left\{ v_q^* - \omega_{re} (L_d i_d + \varphi_f) \right\}$$
(5.6)

上式は、(5.1) 式をそれぞれ *dq* 軸電流 についてまとめたものである。ここで、入力電圧を 以下のように制御する。

$$v_d^* = (L_{dn}s + R_n)i_d^* - \frac{T^*}{J_n s} (L_q i_q)$$
(5.7)

$$v_q^* = (L_{qn}s + R_n)i_q^* + \frac{T^*}{J_n s} \left(\varphi_f + L_d i_d\right)$$
(5.8)

このように両軸電流を FB 制御ではなく電圧入力が大きく変化しない FF 制御を適用する と、スリップ発生時には *i*_q は減少,*i*_d は増加し、*d*q 両軸を利用したトルク垂下が実現できる (図 5.5)。その効果として以下のようなものが考えられる。

- マグネットトルク $\varphi_{f}i_{q}$ のみならずリラクタンストルク $(L_{d} L_{q})i_{d}i_{q}$ の垂下にも効果 的である。
- 逆起電力に干渉成分も加えた $\omega_{re}(L_d i_d + \varphi_f)$ は i_d の上昇に伴って増加し、 i_q 垂下の効果を高める。
- 逆突極性 $(L_d < L_q)$ を有する IPMSM では、 i_d は i_q に比べ L 成分による垂下遅れの影響が小さい。

これらの特性を確認するために、dq両軸とも FB 制御,d軸 FF 制御 q軸 FB 制御,d軸 FB 制御,d軸 FB 制御,d軸 FB 制御 q軸 FF 制御,dq両軸とも FF 制御を行った場合についてそれぞれ実験を行った。各結果 を図 5.6~5.9 に示す。実験条件は 4 章と同様である。



図 5.3: 非干渉化された IPMSM のブロック図



図 5.4: 逆起電力以外を非干渉化した IPMSM のブロック図

この実験結果から、dq 各軸の電流制御系に FF 制御を適用することで、スリップ時に i_q は減少,スリップ時に i_d は上昇することが確認できた。しかし、d 軸の電流垂下はほとんど スリップ抑制に寄与していないようで、 i_d が上昇してもトルクはほとんど変化しておらず、 i_q の垂下を促進する効果も確認できない。この原因は、今回の実験で使用したモータが永 久磁石に偏ったものであったからだと思われる。実験機のパラメータはおよその値で、 極 対数 $12, L_q = 2.6$ mH, $L_d = 2.3$ mH, $\varphi_f = 0.14$ Wb であり、 $\varphi_f : (L_q - L_d) \ge \varphi_f : L_d$ の比はとも に小さく、 i_d が上昇してもトルク,q 軸電流垂下速度にはあまり影響しないことがわかる。



図 5.5: dq 両軸電流垂下を実現した IPMSM の電流制御



図 5.6: スリップ実験結果 (dq 両軸 FB 電流制御)



図 5.7: スリップ実験結果 (d 軸電流のみの垂下)



図 5.8: スリップ実験結果 (q 軸電流のみの垂下)



図 5.9: スリップ実験結果 (dq 軸電流ともに利用した垂下)

5.4 FF+**DOB**制御による*d* 軸電流垂下特性の調整

図 5.10 は dq 各軸に DOB を付加することで、それぞれの電流垂下特性を調整可能とした 制御ブロック図である。各軸 DOB のゲイン,時定数、 K_q, τ_q, K_d, τ_d の値により、電流垂下特 性を調整する。

こちらについても実験を行っており、その実験結果を図 5.11,5.12 に示す。ここでは d 軸 電流の垂下調整を試みる、図 5.11 は τ_d を 0.01 で固定し、 K_d をパラメータとして変化させ た実験結果、図 5.12 は K_d を 1.0 で固定し、 τ_d をパラメータとして変化させた実験結果であ る。また、q 軸側については $K_q = 1.0, \tau_q = 10$ と遅い外乱オブザーバとして設定しており、 先の実験結果 (図 4.8) から、この場合には q 軸単独でもスリップ抑制に効果的な垂下特性を 示すものである。結果を確認すると、各ゲイン,時定数を変化させてもトルク,車輪速度の 応答にはほとんど変化がない。これは上で述べたように使用したモータが d 軸電流が垂下 を起こしてもスリップ抑制にはほとんど効果がない構造のためである。しかし、この実験 ではトルク垂下そのものに影響はしていないものの、スリップ時の i_d 応答は、各パラメー タによって変化していることが確認でき、d 軸電流の垂下特性についても q 軸同様に調整が 可能であることを証明できた。



図 5.10: DOB による dq 各軸電流垂下特性の調整要素を備えた IPMSM の電流制御



図 5.11: スリップ実験結果 (DOB による K_dの調整)



図 5.12: スリップ実験結果 (DOB による T_dの調整)

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では電気モータの電流制御系そのものを改善し、スリップ発生時には急峻なトル ク垂下特性を実現するスリップ抑制制御法を実現した。また、外乱オブザーバとフィード バック電流制御器を適用し、トルク垂下現象とそれによるスリップ抑制効果の調整として、 以下のパラメータ調整を行った。

- FF+FB 制御の比例ゲイン *K_n*の調整
- FF+FB 制御の積分ゲイン K_iの調整
- FF+DOB 制御の外乱オブザーバゲイン K の調整
- FF+DOB 制御の外乱オブザーバ時定数 *τ* の調整

さらに、垂下特性を dq 両軸の電流制御系に適用することで、将来の電気自動車駆動モー タとして有望視されるリラクタンストルク併用型モータにおいてより効果的なスリップ抑 制法を提案した。

- *dq* 両軸 FB 電流制御のスリップ実験
- *d* 軸電流垂下のみによるスリップ抑制
- q 軸電流垂下のみによるスリップ抑制
- *dq* 両軸電流垂下をともに利用したスリップ抑制
- FF+DOB 制御による *d* 軸電流垂下特性 (*K* の調整)
- FF+DOB 制御による d 軸電流垂下特性 (τ の調整)

それぞれの手法について、小型高性能電気自動車 C-COMS2 を用いた実験によりその有効性を確認することができた。

スリップ実験においては、従来手法である FB 制御がスリップ中にも一定のトルク応答 を示すことで車輪速度の急上昇を起こしたのに対し、提案法ではスリップ発生直後から電 流の垂下が起こり車輪速度の急上昇が抑えられたのを確認した。また、FB 制御器と外乱オ ブザーバのゲインを変ことでトルク垂下特性はたしかに調整可能となった。そしてこの結 果より、トルク垂下速度が速いほどスリップ抑制効果が向上することが確認できた。さら に、IPMSM の dq 両軸の電流それぞれについて垂下特性を実現できることも確認し、DOB によって dq 各軸の電流垂下の調整が可能となることが示された。

6.2 今後の課題

今後の課題として、スリップ抑制に最適なトルク垂下を実現するための各制御ゲインの 調整、スリップ抑制効果向上とパラメータ変動へのロバスト性の両立に対する検討が必要 である。*dq*両軸電流を利用した垂下では、それぞれの軸電流垂下の適切な調整法や磁気飽 和などへの対処、リラクタンストルク比が高いモータでの垂下効果の確認などの課題が挙 げられる。

謝辞

まず始めに、2年間にわたって熱心なご指導と的確な助言をいただきました堀洋一教授に 心より御礼申し上げます。また、実験機の使用と製作に関して的確なサポートおよびアド バイスをいただきました内田利之技術専門職員に御礼申しあげます。

実験や研究の進行について貴重な助言をいただきました河島清貴さんと小池卓志さんに は大変お世話になりました。そして研究室生活においては、様々なサポートをしていただ いた呉世訓助教をはじめ研究室の皆様に御礼申し上げます。特に同期の小林邦生君とは互 いに切磋琢磨し、おかげでこの2年間が非常に有意義なものになりました。

最後に、本研究をサポートしてくださいましたすべての皆様に感謝いたします。ありが とうございました。

参考文献

- [1] 日経 BP ネット: "「電気自動車元年」は本当か?", http://www.nikkeibp.co.jp/article/ news/20090119/125721/
- [2] 電気自動車ハンドブック委員会 " 電気自動車ハンドブック ", 丸善株式会社 (2001).
- [3] 清水浩:"電気自動車のすべて",日刊工業新聞社(1992).
- [4] JHFC 総合効率検討特別委員会(財団法人 日本自動車研究所):" JHFC 総合効率検討 結果報告書"(2006).
- [5] 三菱自動車:"次世代電気自動車 i-MiEVの開発", 三菱自動車テクニカルレビュー No.19 (2007).
- [6] Y.Hori : "Future Vehicle driven by Electricity and Control Research on 4 Wheel Motored "UOT March II" ", IEEE Trans. on Industry Electronics, Vol.51, No.5, pp.954-962 (2004).
- [7] Y.Hori, Y.Toyoda, Y.Tsuruoka :" Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV -UOT Electric March-", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.34, No.5, pp.1131-1138 (1998).
- [8] 小竹元基, 大島紀明, 永井正夫:" 駆動性向上を目指した超小型電気自動車の車輪速度 制御",日本機械学會論文集 C 編, Vol.70, No.694, pp.1680-1686 (2004).
- K.Fujii, H.Fujimoto :" Traction Control based on Slip Ratio Estimation Without Detecting Vehicle Speed for Electric Vehicle ", Proc. of PCC-Nagoya'07, pp.688-693 (2007).
- [10] 小玉晋也, 堀洋一:"他励直流モータのトルク垂下特性をまねることによる電気自動車のスリップ抑制制御",電学論 D, Vol.126, No.3, pp.248-254 (2006).
- [11] タイヤ WEB サイト "エコタイヤ性能比較表", http://www.clg-sv.com/tire11.htm
- [12] 山口洋一 "ゴムタイヤの秘密 (新しい高分子材料:より強くより高性能に)", 化学と教育, Vol.46, No.11, pp.710-713 (1998).
- [13] 吹田晴信: "最近のタイヤ転がり抵抗低減化技術",自動車技術, Vol.62, No.3, pp.91-96 (2008).

- [14] 武田洋次,松井信行,森本茂雄,本田幸夫:"埋込磁石同期モータの設計と制御",オーム社 (2001).
- [15] 新政憲, 堺和人: 自動車用永久磁石リラクタンスモータの開発 ", 電気学会誌, Vol.128, No.4, pp.231-234 (2008).
- [16] 岸部太郎, 玉木悟史, 西山典禎, 一海康文, 檜垣俊郎 " EV 用モータコントローラ ", 電 子情報通信学会技術研究報告 EMD, Vol.99, No.77, pp.25-30 (1999).
- [17] 長谷川勝, 石川裕記:"制御から見た電動機", 平成 19 年電気学会産業応用部門大会 1-S7-2, pp.I59-I62 (2007).
- [18] 小池卓志, 内田利之, 堀洋一: * キャパシタで駆動される電気自動車のエネルギー分析 ", 平成 19 年電気学会産業応用部門大会 (2007).

発表文献

- 佐竹正光,河島清貴,内田利之,堀洋一:"電気モータのトルク垂下特性を利用したスリップ抑制制御の実験",電気学会産業計測制御研究会,IIC-08-145,2008.3.10-11,東京
- 佐竹正光,河島清貴,内田利之,堀洋一:"IPMSMのdq 軸電流をともに利用したトル ク垂下特性による電気自動車のスリップ抑制制御",平成20年電気学会産業応用部門 大会, 2-22, 2008.8.27-29,高知
- 佐竹正光,河島清貴,内田利之,堀洋一:"IPMSM 駆動電気自動車の dq 両軸の電流制 御を利用したスリップ抑制制御のためのトルク垂下特性の改善",電気学会自動車研 究会, VT-09-022, 2009.1.26, 東京

付録A C-COMS2 試乗対応用資料

ここでは、本研究の走行実験に使用した C-COMS2 について、起動・充電方法と各諸元^[18] を示しておく。この付録は2008年8月27日~29日に高知県で開催された、平成20年電気 学会産業応用部門大会での COMS 試乗会のために作成した資料をまとめたものである。

A.1 コムスの起動

以下、C-COMS2の起動手順について説明する。

- 1. モニタ、キーボードの接続を確認。
- 2. 座席下右側の中間 (図 A.2) スイッチを入れる。
- 3. 続いて PC 電源 (図 A.3) とディスプレイの電源を入れる。
- 4. ログイン画面表示までしばらく待つ。ログイン。
 - [ユーザ名:root]、[パスワード:horilab]
- \$ cd /home/horilab 5. ディレクトリ移動。
- 6. シェルスクリプト実行。
 \$ sh reprepare.sh

 7. デモ用プログラムの実行。
 \$./demo_program
- 8. キースイッチを LOCK から ACC, ON へと一段階ずつ回す。次にシフトスイッチが ニュートラル (N) 状態になっているのを確認してから、キースイッチをさらにもう 一段階 START へひねり戻す (ばねで自然に戻る)。
- 9. 電池節約のためにディスプレイ電源を切る。
- 10. シフトスイッチを"N"から"D"に切り替え、サイドブレーキを下ろして走行。



図 A.1: コムス全体写真



図 A.2: 中間スイッチ



図 A.3: PC 背面



図 A.4: キースイッチとシフトスイッチ

A.2 コムスの充電

ここではC-COMS2のキャパシタ充電について説明する。

- まず、シフトスイッチをニュートラル(N)にし(キースイッチはそのまま)、サイドブレーキを引き、充電器の電源がOFFになっていることを確認。
- 充電器のコネクタをコムスの充電口に差し込む。コネクタカバーのねじを回す。(キャ パシタ側の差込端子間には電圧が掛かっているので、ショートさせないように注意!)



図 A.5: 充電器

- 1. 電源スイッチを上げて充電器を起動。
- 2. set ボタンを押しながら電流電圧出力値を"97V50A"に調整する (高知での電源容量は 7kW なので 100A にはしない)。
- 3.赤いoutput スイッチを押す。
- 4. 電圧が指令値 (97V) に到達すると、電流が絞り込まれていく。

大体電流が10A以下になったら、output スイッチを押し充電器からの出力を止める。 5. 充電器の電源を切る。

コネクタを抜き、コムス側のキャップを締める (コムス側キャパシタ端子はショートさせな いように注意!)。充電器コネクタのキャップを締める。周囲を確認してからサイドブレーキ を降ろし、シフトスイッチを D(前進)、もしくは R(後進) に切り替えて走行。

A.3 C-COMS2諸元^[18]

C-COMS2 試乗時の参考資料として、C-COMS2 の各諸元などを載せておく。詳細については文献 [18] を参照のこと。

C-COMS2 はトヨタ車体(株)製の COMS ロングタイプ(車体価格90万円)を、電気二重 層キャパシタ(EDLC)で走行できるように改造した電気自動車である。EDLC には(株)パ ワーシステム製32.4V110F モジュール9個(およそ200万円)を3直列3並列に積んでいま す(全体で耐圧97.2V静電容量110F)。左右後輪内蔵のインホイールモータ型の永久磁石同 期電動機で駆動する。また、このモータは減速ギア無しのダイレクトドライブ(DD)モータ に積み換えてある。

	鉛蓄電池 (6S)	EDLC(3S3P)	ratio
電圧	72V	97.2V	0.74
蓄電容量	3744 Wh	144 Wh	26
重量	130kg	40kg	3.25
車両重量	400kg (両電池を搭載中)		-
容量	47.3l	44.2l	1.07
内部抵抗	$21\mathrm{m}\Omega$	$22\mathrm{m}\Omega$	0.96
一充電走行距離	$45 \mathrm{km}$	$2.5 \mathrm{km}$	18
充電時間	13h	60s	1/780

表 A.1: C-COMS2 に搭載されている EDLC と鉛蓄電池の比較

表 A.2: 鉛蓄電池と EDLC1 モジュールあたりの諸元

			電気二重層キャパシタ諸元	
	1200) HID		電圧	32.4V
ムが电圧	12 V		定格電流	60A
公仲谷里	60An		容量	110F
谷重 (25 ,20A)	52Ah		蓄電容量	16Wh
里重	21kg		重量	4.4kg
容積	7.88l	-		4 01/
内部抵抗 3.5mΩ(満充電)		-	山里 内部折抗	22mO

A.3.1 電気二重層キャパシタと二次電池の比較

表 A.1 には鉛蓄電池と EDLC の性能比較を示す。蓄電電力量は鉛蓄電池の方が 26 倍と大きな差がある。しかし、充電時間を見ると EDLC のほうが 780 倍も速い。これを同じ電力量に換算すると EDLC の方が 30 倍高速に充電できることを表しており、高速充電による様々な利用法が考えられる。

一充電走行距離はEDLCと同じ電力量だとすると鉛蓄電池は1.73[km]となり電気二重層 キャパシタの70[%]しか走行できないことになる。これは鉛蓄電池は電圧から残存容量の 予想が難しく高い放電深度での使用ができないのに対し、電気二重層キャパシタは電圧か ら残存容量がそのまま分かるので高い放電深度での利用が可能であるためと考えられる。

A.3.2 C-COMS2の総合効率

表 A.3 は車重がほとんど同じと換算したときの C-COMS2 と小型車, ハイブリッド車の燃 費を比較したものである。総合的に見て電気二重層キャパシタを利用することにより燃費 の改善があることが分かる。

車種	燃費 [km/l]
C-COMS2(EDLC)	52.1
C-COMS2(Lead-acid battery)	43.9
小型車	about 30
ハイブリッド自動車	about 45

表 A.3: 燃費(*注:それぞれ車両総	達量 450kg に換算)
----------------------	---------------