

技術発表(5)

過励磁効果を利用したヒステリシス 電動機の高効率運転

久保田朋次

過励磁効果を利用したヒステリシス電動機の高効率運転

久保田 朋次 茨城大学工学部技術部

1 はじめに

ヒステリシス電動機は同期電動機の一つであるが、自己始動が可能、始動トルクが大きい、回転子構造が簡単で堅牢、振動が小さいなどの長所をもつ。しかし、低出力、低力率、低効率などの欠点がある。ヒステリシス電動機の電動機特性を向上させる方法の一つに瞬時過励磁運転がある。瞬時過励磁を行った場合は、しない場合と比較して入力電流が減少し、力率、効率が大きく向上することが正弦波電圧駆動の実験により実証されている。また、瞬時過励磁効果は、負荷の急変などにより電動機が同期速度の上下に振動すると、その効果が失われるという性質をもつ。このため、瞬時過励磁効果の低下を感知し再過励磁を行い高効率状態を維持する自動瞬時過励磁運転が提案されている。しかし、従来法の自動瞬時過励磁運転は、負荷の状態や過励磁率によって運転が不安定となり電動機が振動していた。

本研究は、PWM インバータを用いて細かな電圧制御を可能にし、新しい過励磁率の決定法の提案および過励磁効果低下の判断基準の再検討を行うことで、自動瞬時過励磁運転の安定化を図った。PWM インバータを使用した実験結果より、従来法に比較してより安定した高効率運転を実現することができた。

2 瞬時過励磁運転

瞬時過励磁運転とは入力電圧 V_i で同期運転している電動機の入力電圧を瞬時的に $nV_i (n > 1)$ まで上昇させ、ある短い期間を経てまた元の入力電圧 V_i に戻す方法をいう。ここで n を過励磁率と定義する。

ヒステリシス電動機の電動機特性は、回転子ヒステリシスリングが描くヒステリシスループの大きさ・形状に依存する。図 1 は同期脱出時の通常励磁のループ L_1 と過励磁後のループ L_2 である。瞬時過励磁を行うことで、通常励磁のループとは大きさ・形状が異なるループを形成し、出力の増加、入力電流の減少、力率・効率が改善できる。

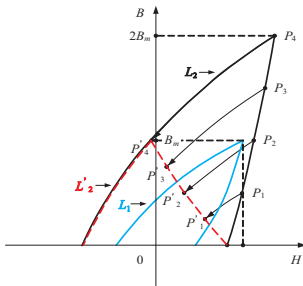


図 1 同期脱出時の通常励磁のループ L_1 と過励磁後のループ L_2

3 PWM インバータ駆動瞬時過励磁運転

瞬時過励磁運転では同期運転中に入力電圧を上昇、降下させる必要がある。PWM インバータを使用して入力電圧の上昇、降下を行う場合、プログラム上で指令値の変調度を調節することで可能になる。そこで PWM インバータを使用し変調度を調節する方法を適用して瞬時過励磁を行った。過励磁後の同期脱出トルクと、負荷トルクを一定に保った状態で過励磁を行った場合の電動機特性を測定した。図 2 に使用した実験装置の

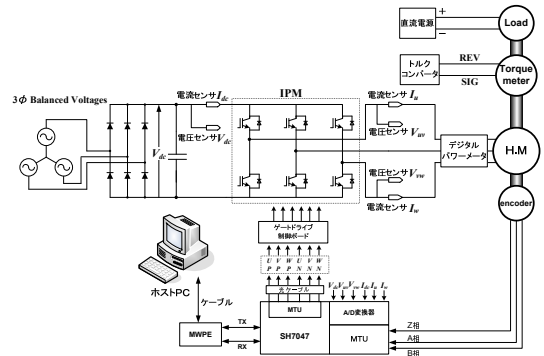


図 2 実験装置の概要

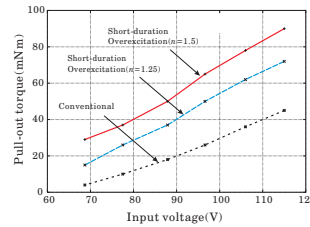


図 3 同期脱出トルク

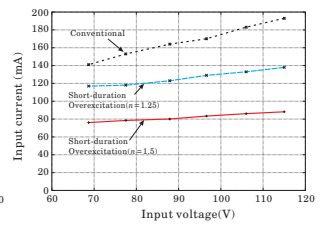


図 4 入力電流特性

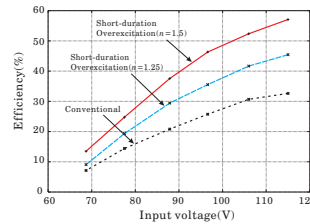


図 5 効率特性

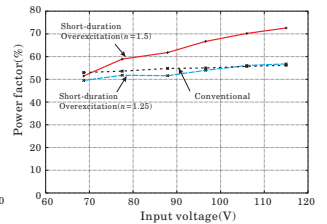


図 6 力率特性

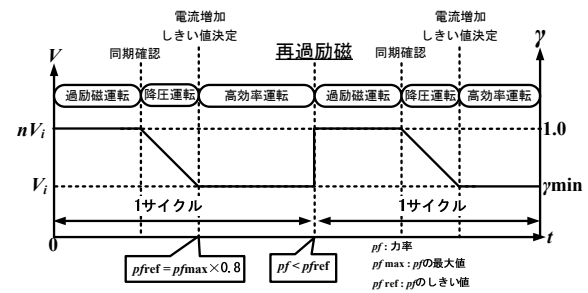


図 7 従来の自動瞬時過励磁運転

概要を示す。また図 3~6 に測定結果を示す。

実験結果から、通常運転と比較して、瞬時過励磁運転を行うことで出力トルクが増加したことがわかる。また、同じ出力に対し入力電流が減少し、結果として効率が改善していることもわかった。しかし、力率に注目すると低過励磁率の場合、通常運転とほとんど変わらず改善の度合いは小さいという結果となった。

4 従来の自動瞬時過励磁運転

図 7 に従来の自動瞬時過励磁運転の電圧変化を示す。3つの運転モードに分けて自動瞬時過励磁による高効率化を行う。過励磁運転では同期速度に達するまで過励磁電圧 nV_i で運転する。降圧運転は変調度を下

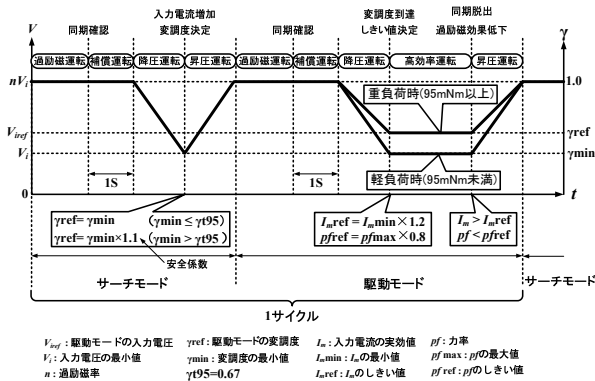


図 8 提案した自動瞬時過励磁運転

げることを入力電圧を減少させ、入力電流の変化が増加に転じた時の変調度 γ_{\min} を記憶し、力率のしきい値を決定する。高効率運転は先の変調度 γ_{\min} で運転することで高効率運転となる。また過励磁の効果が減少すると力率が下がるため、しきい値以下となった場合に再び過励磁運転へと移行する。

ここで使用する力率のしきい値は、図 6 の測定結果より通常運転との変化率が 20% 程度であったため、降圧運転直後の力率 pf_{\max} の 80% の値としていた。

5 自動瞬時過励磁運転の安定化

図 7 の運転法を改良し自動瞬時過励磁運転の安定化を図った。図 8 に本研究で提案した自動瞬時過励磁運転の電圧変化を示す。

文献 [1] で任意の一定負荷、過励磁電圧において入力電流が最小で効率が最大となる過励磁率が存在することが報告されている。そこで、従来法は降圧運転中に電流が減少から増加に転じる部分を検出することで、高効率となる過励磁率を設定し高効率運転で使用する変調度を決定している。しかし、重負荷時では入力電流の増加を検出する前に、入力電圧低下に伴う出力トルク不足が生じ電動機が同期脱出していた。同期脱出することで過励磁効果が短い時間で低下していたため重負荷時での高効率運転が不可能であった。

また、従来法は力率の減少変化のみを過励磁効果低下の判断基準として利用していたが、図 6 の力率の測定結果より、低過励磁率では力率の通常運転時との変化が小さく瞬時過励磁効果低下を正確に判断できないことがわかった。

5.1 新しい過励磁率決定法

重負荷にも対応するため従来法で運転が不安定となった過励磁電圧 $nV_i=180[V]$ 、負荷トルク $T_L=95[mNm]$ を基準とし、重負荷時には入力電圧の減少幅を低く設定し出力トルク不足を抑制する方法を提案する。

この方法を実現するため、図 8 のように一度過励磁を行い負荷の状態を検索し(サーチモード)、その後負荷の状態により過励磁率を調整し高効率運転を行う(駆動モード) アルゴリズムを構築した。

負荷トルクは、サーチモードの降圧運転において入力電流が増加に転じた時点での変調度 γ_{\min} の値により把握する。軽負荷時では γ_{\min} は小さく、重負荷時では γ_{\min} は大きくなる。また、図 8 の γ_{t95} は、 $nV_i=180[V]$ 、 $T_L=95[mNm]$ で入力電圧を下げ入力電流が増加に転じたときの変調度である。 γ_{\min} が γ_{t95} を超えた場合を重負荷と判断し、 γ_{\min} に安全係数をかけ駆動モードの過励磁に使用する変調度 γ_{ref} の調節を行う。駆動モードではサーチモードで算出された変調度 γ_{ref} を使用し過励磁を行い高効率駆動する。

表 1 負荷トルク 100mN・m 時の実験結果

	通常運転	従来法	提案法
過励磁電圧 $nV_i[V]$		180	180
入力電圧 $V_i[V]$	164	122	134
過励磁率 n		1.48	1.34
入力電力量 $W_s[kWs](300s)$	11.4	9.47	8.96

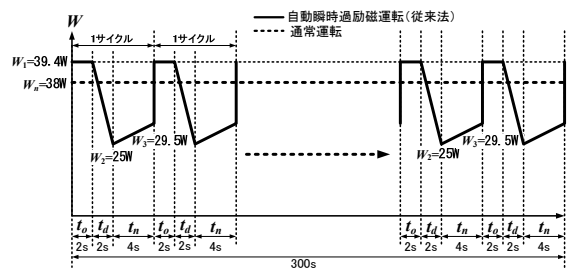


図 9 通常運転と従来の自動瞬時過励磁運転の入力電力の時間変化

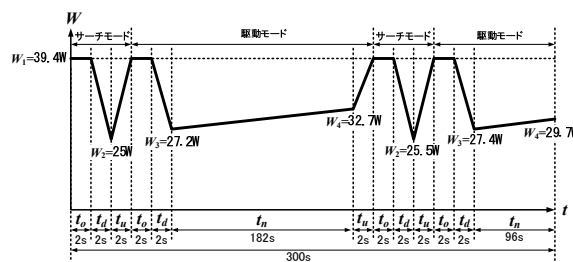


図 10 提案した自動瞬時過励磁運転の入力電力の時間変化

5.2 過励磁効果低下の判断基準の再検討

過励磁効果の低下により入力電流が上昇する。入力電流の通常運転時に対する変化率は、図 4 の測定結果より低過励磁率でも平均で 20% 程度あることがわかる。よって判断基準に入力電流の上昇変化と力率の減少変化の両方を利用した。入力電流を使用した判断方法では、図 4 の測定結果より駆動モード中の降圧運転終了時の入力電流 γ_{\min} の 120% の値をしきい値とし、入力電流がしきい値以上となった場合を効果低下と判断するようにした。

6 実験結果

従来法で運転が不安定であった $T_L=100[mNm]$ をかけた状態で、300s 間電動機を駆動させ入力電力の時間変化を測定し、入力電力量を比較した。表 1 に実験結果を、図 9 に通常運転と従来法、図 10 に提案法の入力電力の時間変化を示す。提案法を用いることで入力電力量を少なくできた。

7 おわりに

提案法は従来法に比べ入力電圧低下を抑制したことで高効率状態を長時間維持することができ、安定した運転が可能になった。また、入力電力量を比較すると他の制御法より最大で約 20% 削減でき、高効率運転を実現できた。

参考文献

- [1] T.Ishikawa, T.Kataoka: "V curve of hysteresis motor", *IEEPROCEEDINGS - B*, Vol.138, No.3, p.137-141(1991)
- [2] T. Kubota, T. Tamura, K. Kurihara, "High-efficiency operation of PWM inverter-driven hysteresis motor with short-duration overexcitation" *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. and Systems*, Tokyo, Japan, Nov.16-18, 2009.

過励磁効果を利用した ヒステリシス電動機の高効率運転

茨城大学工学部技術部
久保田 朋次

2010.9.3 技術部研修会

目次

- ヒステリシス電動機
- 目的
- 瞬時過励磁運転
- PWMインバータ駆動瞬時過励磁運転
- 自動瞬時過励磁運転
- まとめ

ヒステリシス電動機

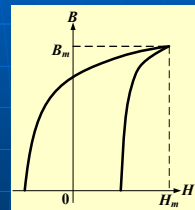


図1 ヒステリシス電動機の断面図

ヒステリシス電動機の出カトルク

- 出カトルクはヒステリシスリングのループ面積に比例

$$T_{po} = K \oint B dH$$



電動機特性はヒステリシスループの
大きさ、形状に依存する

特長欠点

ヒステリシス電動機

同期電動機の一つ

特徴 振動、騒音が非常に小さい
単純で堅牢な構造
自己始動が可能

永久磁石同期電動機等に比較して

出力、力率、効率が低い

改善策として

瞬時過励磁運転

研究目的

ヒステリシス電動機の瞬時過励磁運転 **高効率駆動**

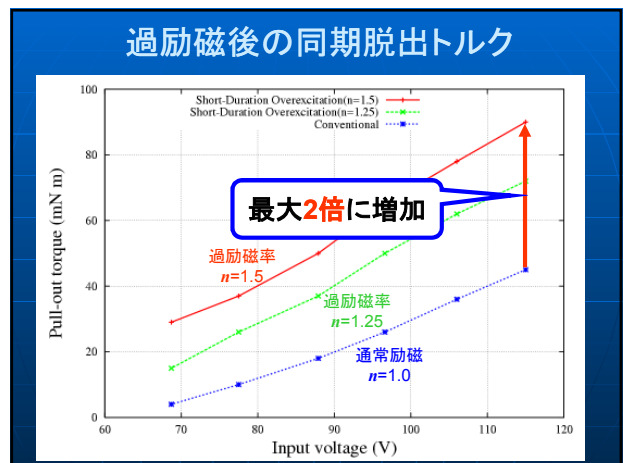
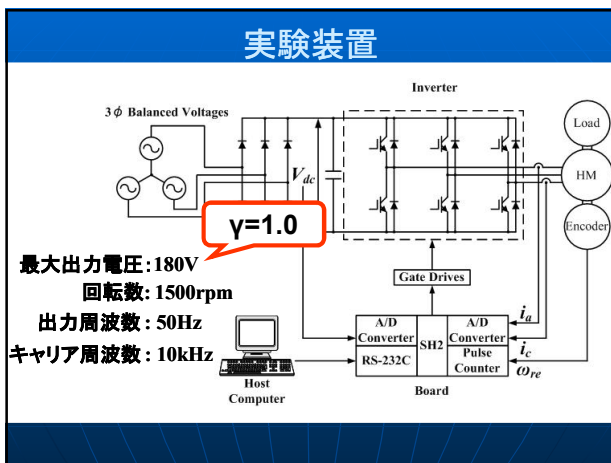
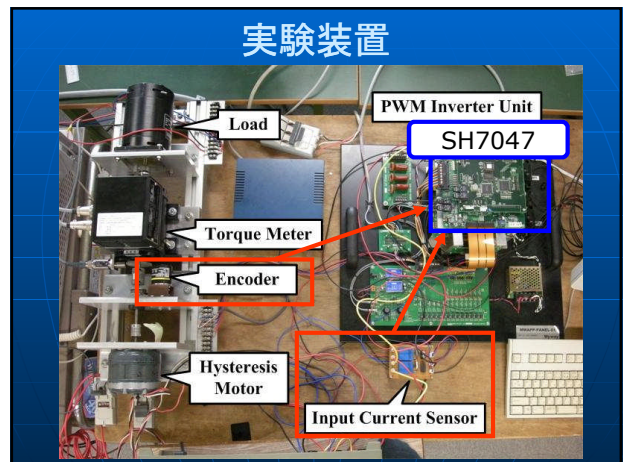
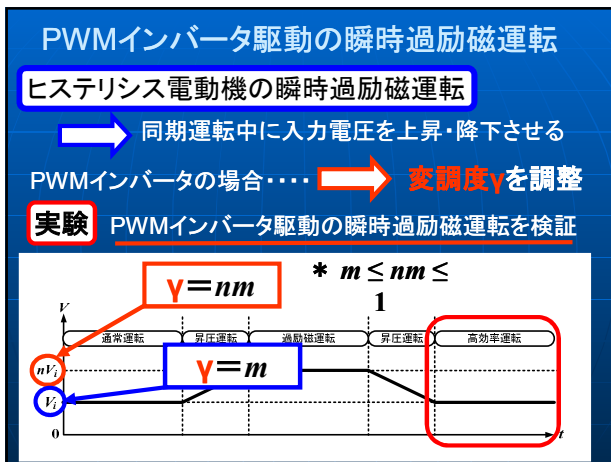
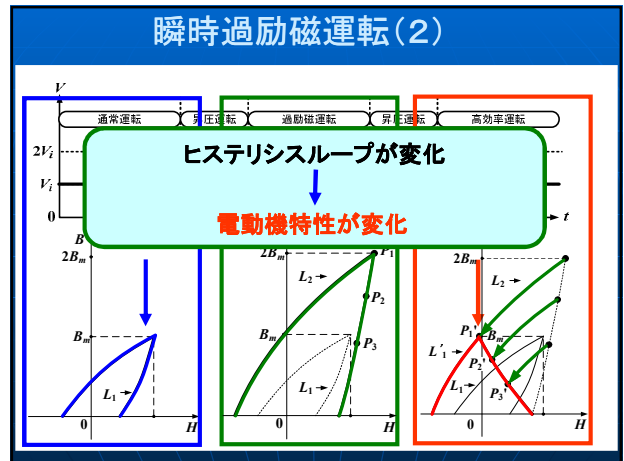
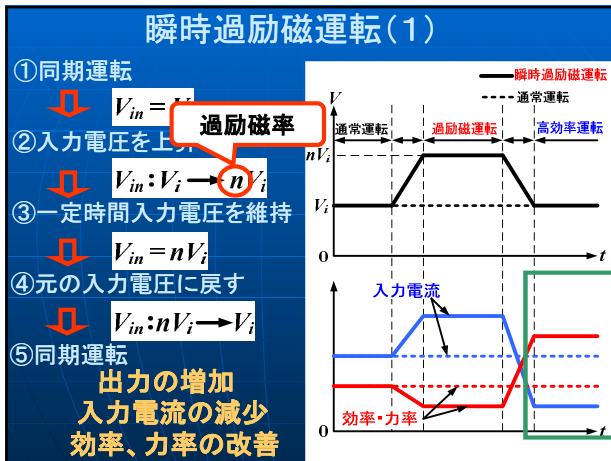
本研究では……

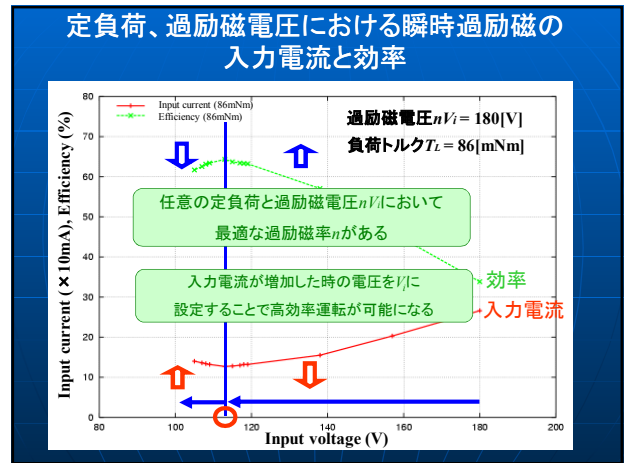
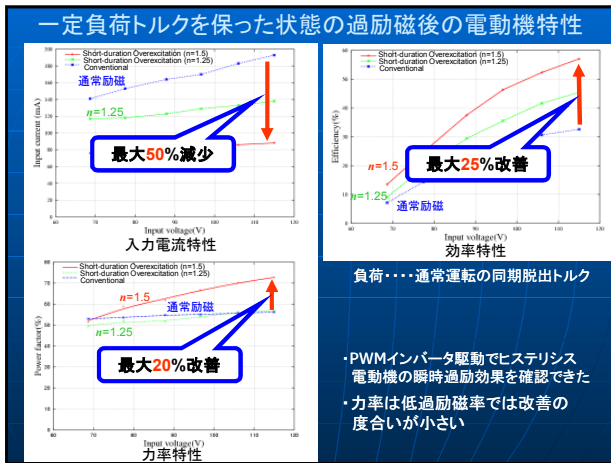
PWMインバータ駆動により瞬時過励磁運転

①実験により瞬時過励磁効果を検証

②自動瞬時過励磁運転の安定化

安定した高効率運転の実現を目指す





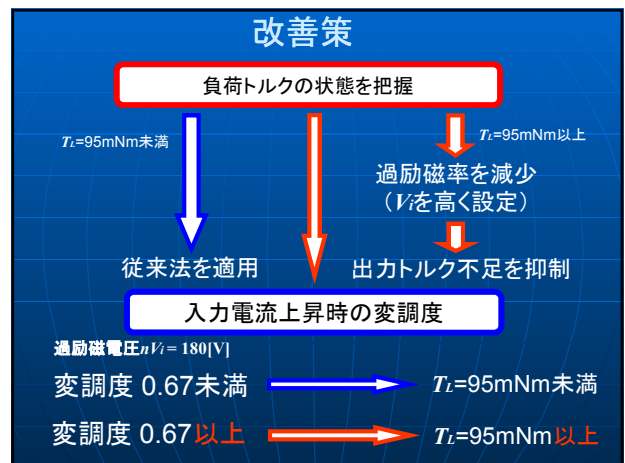
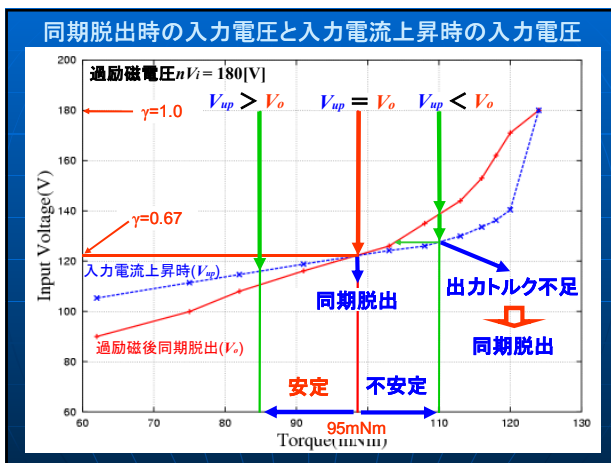
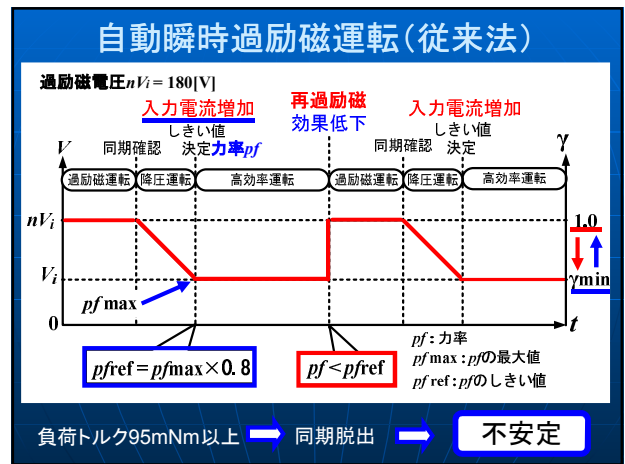
自動瞬時過励磁運転

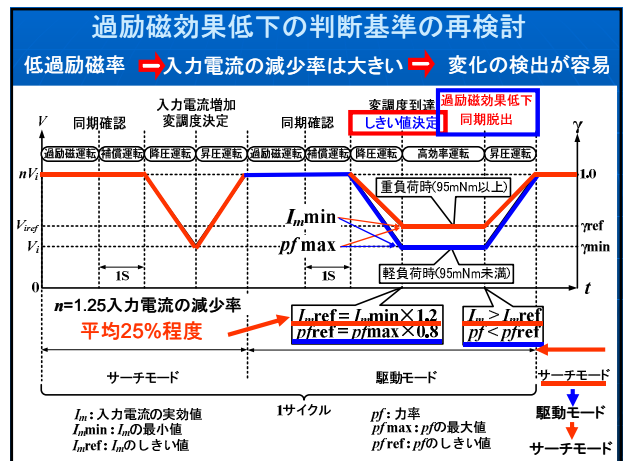
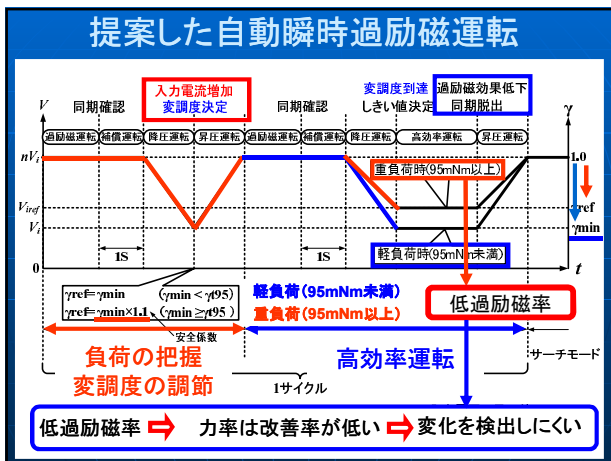
ヒステリシス電動機の瞬時過励磁効果

振動などにより効果が低下
入力電流の増加、力率、効率の低下

自動瞬時過励磁運転

瞬時過励磁効果の低下を感知
入力電流の増加、力率の低下
再度過励磁運転を行い高効率状態を維持する





実験

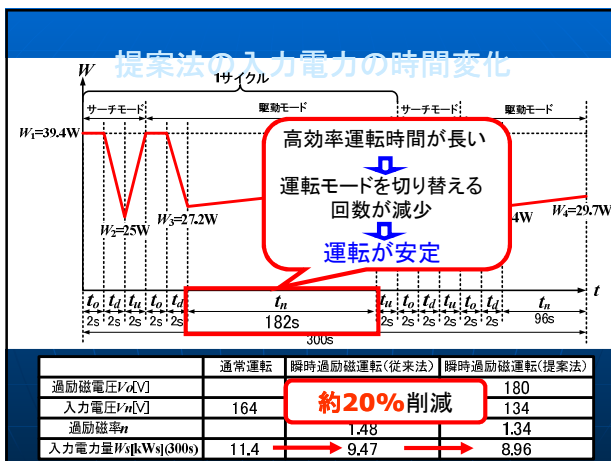
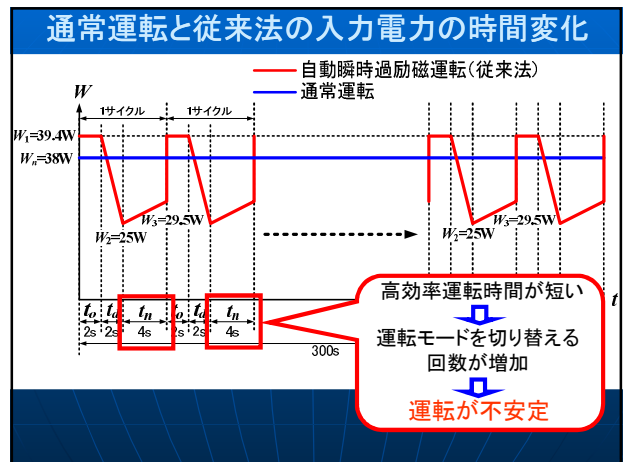
目的
提案した方法により安定した高効率運転が可能となったか確認する

実験方法
一定負荷で一定時間ヒステリシス電動機を駆動

100mNm 300s

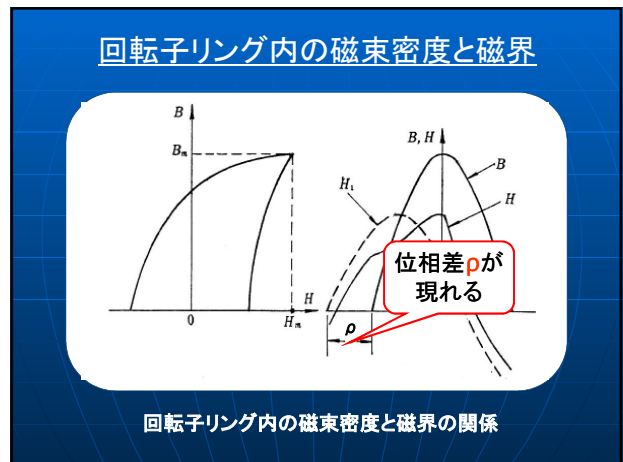
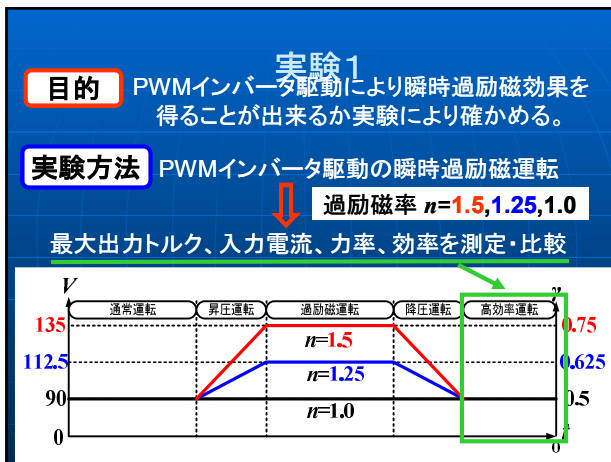
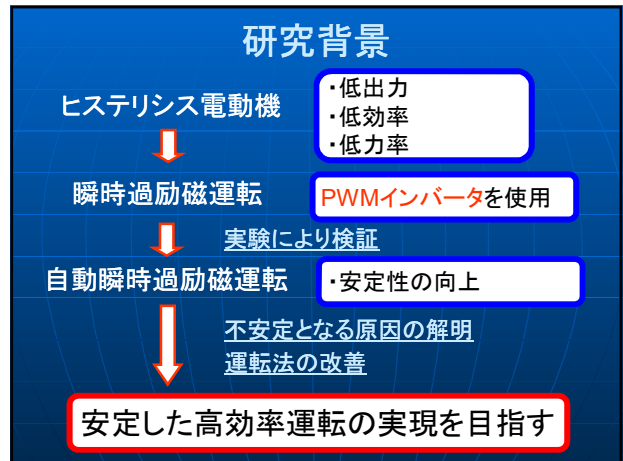
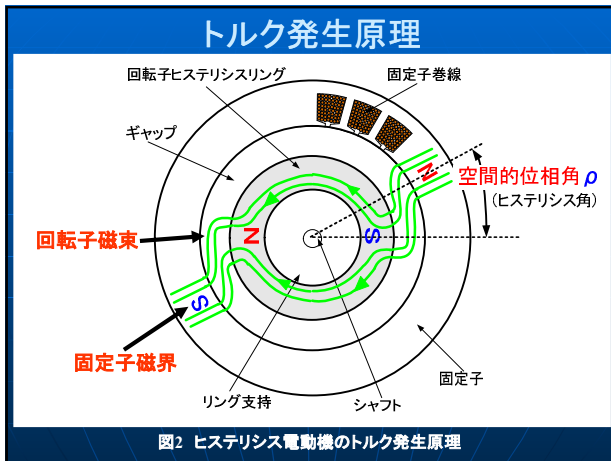
提案法と従来法、通常運転の入力電力を測定

入力電力量を計算し比較



まとめ

- ・PWMインバータ駆動でもヒステリシス電動機の瞬時過励磁効果を確認できた
- ・自動瞬時過励磁運転の安定化を図った。実験により安定した高効率運転を実現できた。



ヒステリシス電動機のトルク式と等価回路

トルク式 **ループ面積に比例する**

$$T = \frac{pV_r}{2\pi} \oint B dH \quad (1)$$

p : 極対数
 V_r : 回転子リングの体積
 B_m : B の最大値
 H_{ml} : H の基本波の最大値
 $\oint B \cdot dH$: ヒステリシスループの面積

$$\approx \frac{pV_r}{2} \cdot B_m \cdot H_{ml} \cdot \sin \rho \quad (2)$$

等価回路 **ループの形状によって変化する**

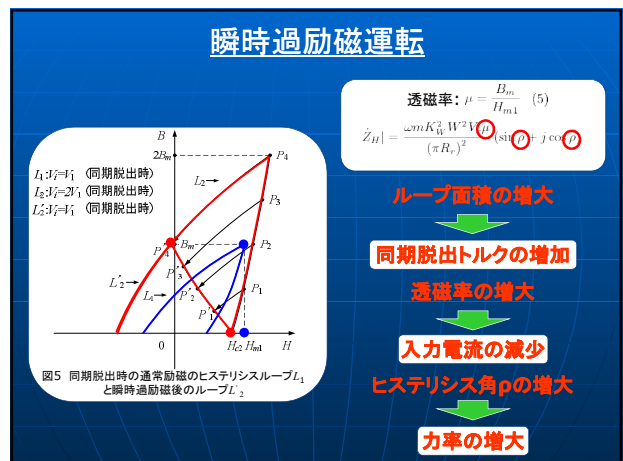
ヒステリシス等価インピーダンス

$$\hat{Z}_H = r_H + jx_H$$

$$\hat{Z}_m = |Z_H| (\sin \rho + j \cos \rho) \quad (3)$$

$$|Z_H| = \frac{\omega m K_w^2 W^2 V}{(\pi R_r)^2} \sin \rho \quad (4)$$

K_w : 巻線係数
 W : 1相の巻数
 m : 相数
 ω : 電源角周波数
 R_r : リングの平均半径
 μ : 透磁率



定負荷の瞬時過励磁後のヒステリシスループ

- 入力電流の増加
- インピーダンスの減少
- 透磁率の減少
- 力率の増大
- ヒステリシス角の増大

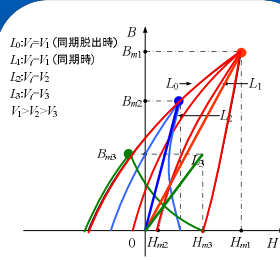


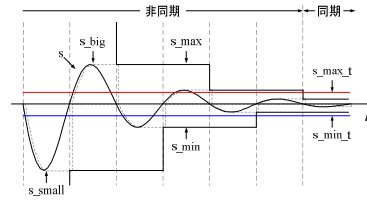
図7 定負荷の瞬時過励磁後のヒステリシスループ

同期確認法

$$\omega_{re}[kT] = \frac{2\pi p \{n[kT] - n[(k-1)T]\}}{PT} \quad (5)$$

$$s = \frac{\omega - \omega_{re}}{\omega} \quad (7)$$

ω_{re} : 回転子電気角速度、 T : サンプル周期、
 p : 極対数、 n : エンコーダ出力パルス数、 s : すべり、
 P : エンコーダ1回転のパルス数、 ω : 電源角周波数



すべりの変化

入力電流の実効値、力率の算出法

$$i_u = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (8)$$

$$i_v = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta\right) \quad (9)$$

$$i_w = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta\right) \quad (10)$$

$$I = \frac{i_u}{\sqrt{2} \sin\left(\arctan\left(\frac{\sqrt{3}i_u}{i_u + 2i_w}\right)\right)} \quad (11)$$

$$pf = \cos\theta = \cos\left\{\omega t - \arctan\left(\frac{\sqrt{3}i_u}{i_u + 2i_w}\right)\right\} \quad (12)$$

離散的な値

原因

- A/D変換の量子化
- 三相平衡と仮定
- ゼロクロスの影響

- 入力電流が±1[mA]未満の時は1サンプル前の i_u 、 i_w の値を使用する
- 1周期 T_v の平均値を取る

$$I_m \cdot pf_m$$

過励磁後の同期脱出トルクと入力電流上昇時のトルク

