

送風機器用コンデンサモータの特性に及ぼすひずみ波電圧の影響

廣塚 功*, 坪井 和男*, 上田 玄**, 松井 景樹*

Effects of the Distorted Wave Source Voltages on Capacitor Motor Performances used in Electric Fans

Isao HIROTSUKA*, Kazuo TSUBOI*, Fukashi UEDA**
and Keiju MATSUI*

Recently, distortion of power source voltage in distribution power lines due to harmonic current has increased. Household electrical appliances that have a motor connected directly to a power source are affected by harmonic voltage in the distorted voltage. The capacitor motor (CRM), which is usually used in electric fans, is affected by harmonic voltage, which may cause, for example, lower efficiency or abnormal temperature rise.

In this paper, the performance of the CRM, which is supplied the voltage which superimposes a low-order harmonic voltage on the fundamental voltage, used in the electric fan is examined experimentally and theoretically. As a result, the following were clarified:

- (1) The current and the input power of the CRM is increased according to the increase in the ratio of the harmonic voltage to the fundamental voltage.
- (2) The input of the main winding, rather than that of the auxiliary winding, is increased by the harmonic voltage.
- (3) The proposed calculation method is useful if the current of rocked rotor test is greater than the rated current and the supplied voltage of the no-load test is greater than the rated voltage.

Keywords : capacitor motor, time harmonic voltage, electric fan, equivalent circuit

1. まえがき

近年、インバータなどの半導体応用機器の普及に伴い、配電系統の電圧ひずみが問題となってきた。こうした電圧ひずみにより、配電系統に直接接続されるモータでは、効率低下、騒音発生、異常温度上昇などの悪影響を生じる。このため、平成6年には資源エネルギー庁共益事業部より、6.6kV配電系統の電圧ひずみ率は5%以内と定めた高調波抑制ガイドライン

が通達された⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、軽負荷時には高調波電流の影響が大きくなり、系統の末端である小事業所または家庭内においてはこのガイドライン以上の電圧ひずみ率になっている場合があると推測されている。

モータが直接配電系統に接続される機器では、こうしたひずみ波電圧に含まれる高調波電圧の影響を、機器を駆動しているモータが直接受けることとなる。これらの機器の中でも送風機器、特に、換気扇および扇風機などとして多用されており、その駆動用モータとしてコンデンサモータ（以下、CRMと略記）が系統に直接接続される構成となっている場合が多い。これ

* 電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

** 中部電力 (Chubu Electric Power Corporation)

ら機器は長時間連続で運転されることが多いことから、長時間に亘り電源電圧に含まれる高調波電圧により、効率低下や温度上昇などの悪影響を受けている。これらの影響を明確にしておくことは、基本的に極めて重要な事項である。

そこで、本論文では、送風機器である換気扇および扇風機に用いられている CRM に及ぼすひずみ波電圧の影響について詳細に考察した結果を報告するものである。すなわち、電圧ひずみの主原因となる低次の高調波電圧を、基本波電圧に重ね合わせて CRM に印加した場合における、CRM の入力、力率、効率、回転数などの各種特性について実測するとともに、特性算定結果と比較検討し、詳細に考察している。その結果、これらの機器用に専用設計・製造された CRM の諸特性に及ぼす高調波電圧の影響を、理論的かつ実験的に明らかにしている。また、この種の CRM に対する定数決定法についても詳細な検討を行っている。

なお、本論文の一部は電気学会全国大会などで発表した内容⁽³⁾⁻⁽⁷⁾に基づいているが、さらに加筆修正している。

2. CRM の特性算定法

筆者の一人らは、既に、CRM の特性を精度よく算定できる方法を提案している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。ここでは、本論文の理解を容易にするために、文献(8)および(9)に基づき、その方法を簡単に記しておく。

本方法では、以下の仮定をおいて解析を行っている。

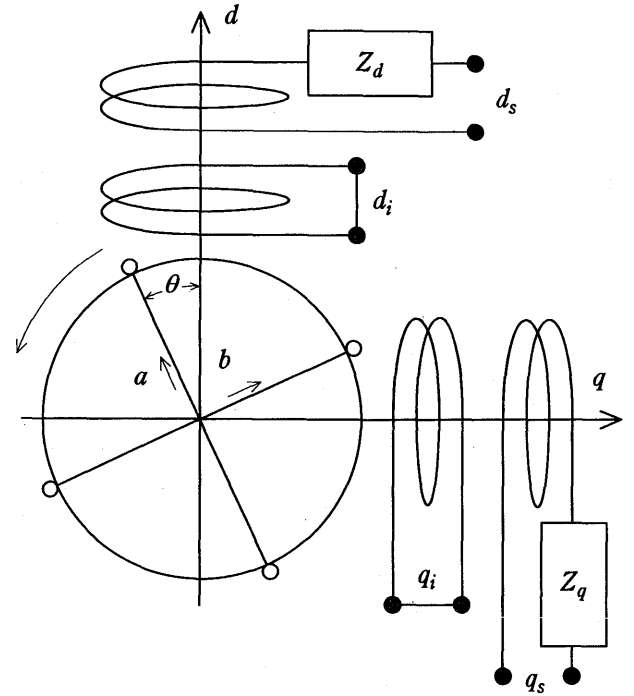


図1 解析モデル

- (1) 主巻線と補助巻線との中心軸は空間的に $\pi/2$ [rad] 隔てて位置している。
- (2) 回転子は対称である。
- (3) 空間的高調波、漂遊負荷損および磁気飽和の影響は考慮しない。

以上の仮定に基づけば、正弦波電源駆動時の CRM の解析モデルは図1のようになる。ここで、 d_s および q_s は主巻線および補助巻線、 d_i および q_i は固定子鉄損を模擬する平衡うず電流回路、 a および b は平衡回転子巻線、 Z_d および Z_q は外部に挿入する任意のインピーダンス、 θ は固定子 d 軸と回転子 a 軸とのなす空間的位相角である。

このモデルに基づき、CRM に対する対称軸上の最終的な電圧方程式を求めると(1)式となり、等価回路は図2となる。ここで、各記号の意味は以下のようである。

$V_{1f}\varepsilon^{-j\alpha}$: 正相分印加電圧、

$V_{1b}\varepsilon^{j\alpha}$: 逆相分印加電圧、 $\alpha = \tan^{-1} \beta$ 、

β : 補助巻線に対する主巻線の実効巻数比、

R_{ds} : 主巻線抵抗、 R_{qs} : 補助巻線抵抗、

x_{11}' : 固定子漏れリアクタンス、

x_{12}' : 固定子側に換算した回転子漏れリアクタンス、

r_i' : 固定子鉄損抵抗、

r_2' : 固定子側に換算した回転子抵抗、

x_m' : 相互リアクタンス、 s : 滑り、

R_C : コンデンサの抵抗、

X_C : コンデンサのリアクタンス。

ただし、CRM の場合、主巻線には外部インピーダン

$$\begin{array}{c|c|c} & 1f & 1b \\ \hline 1f & \begin{array}{c} V_{1f}\varepsilon^{-j\alpha} \\ \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} R_{ds} + r_i' + jX_s \\ +(\dot{B} - R_D) \\ -(\dot{B} - R_D) \\ R_{ds} + r_i' + jX_s \\ +(\dot{B} - R_D) \end{array} \\ \hline 1b & \begin{array}{c} V_{1b}\varepsilon^{j\alpha} \\ \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} -(\dot{B} - R_D) \\ R_{ds} + r_i' + jX_s \\ -(\dot{B} - R_D) \\ R_{ds} + r_i' + jX_s \\ +(\dot{B} - R_D) \end{array} \\ \hline 2f' & & \begin{array}{c} r_i' + jx_m' \\ \\ \\ \end{array} \\ \hline 2b' & & \begin{array}{c} r_i' + jx_m' \\ \\ \\ \end{array} \end{array} \quad *$$

$$\begin{array}{c|c|c} & 2f' & 2b' \\ \hline * & \begin{array}{c} r_i' + jx_m' \\ \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} r_i' + jx_m' \\ \\ \\ \end{array} \\ \hline & \begin{array}{c} r_i' + \frac{r_2'}{s} + jX_r \\ \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} r_i' + \frac{r_2'}{2-s} + jX_r \\ \\ \\ \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{c|c} 1f & \begin{array}{c} \dot{I}_1^{1f} \\ \dot{I}_1^{1b} \\ \dot{I}_s^{2f'} \\ \dot{I}_{2-s}^{2b'} \end{array} \\ \hline 1b & \\ \hline 2f' & \\ \hline 2b' & \end{array} \quad (1)$$

$$R_D = (R_{ds} - \beta^2 R_{qs})/2, \quad \dot{B} = \beta^2 (R_C - jX_C)/2$$

$$X_s = x_m' + x_{11}', \quad X_r = x_m' + x_{12}'$$

4. 実験結果と検討

(4-1) 換気扇と扇風機との比較

図 4 に、印加電圧を 1 次+5 次, 5 次調波含有率 $D_{fv5}=20\%$ とした場合における換気扇および扇風機の電流を, $D_{fv5}=0\%$ の場合に対する比として示す。同図より明らかなように, 全電流 I_s はいずれの機器においても増大している。これは, 補助巻線電流 I_{qs} の減少分より, 主巻線電流 I_{ds} の増大分が大きいから, I_s が増大したものと考えられる。なお, I_{ds} が増大しているのは, $V_a=100V$ 一定としたため, D_{fv5} の増加に伴い, 基本波電圧 V_1 が減少し, 回転数の低下により, I_1 はほぼ一定となり, D_{fv5} の増加にほぼ比例して I_5 が増大しているためと考えられる。また, 換気扇の I_{ds} の増大割合は扇風機のそれより大きく, I_{qs} の減少割合はほぼ同程度であるため, 換気扇の I_s の増大割合は扇風機のそれより大きくなっている。

図 5 に, 換気扇および扇風機の有効電力を $D_{fv5}=0\%$ の場合に対する比として示す。同図より明らかなように, 主巻線有効電力 P_{ds} はいずれの機器においても増大しているが, 補助巻線有効電力 P_{qs} は減少している。 P_{ds} の増大および P_{qs} の減少の結果, 全有効電力 P_a は $D_{fv5}=20\%$ の場合であっても, $D_{fv5}=0\%$ の場合とほぼ同じ値となっている。なお, $D_{fv5}>20\%$ となる場合には, P_1 の減少分より P_5 の増大分が大きくなり, $D_{fv5}=0\%$ の場合に比べ, P_a は増大することを確認している。

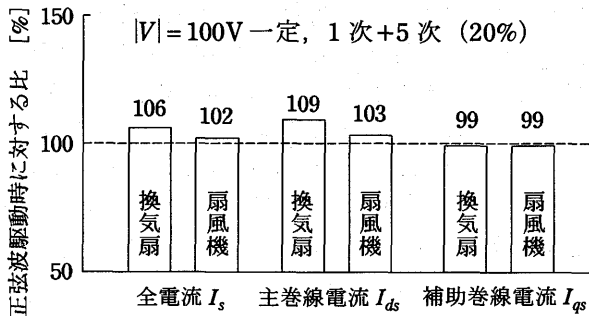


図 4 電流特性

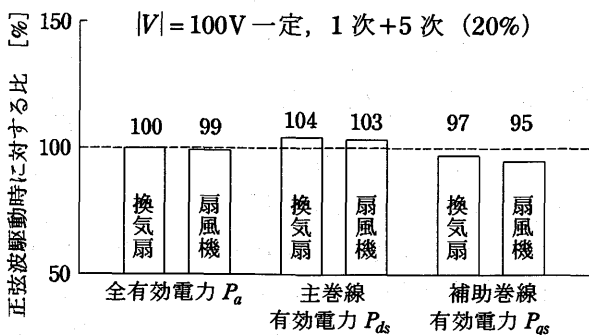


図 5 有効電力特性

(4-2) 換気扇における高調波電圧の影響

図 6 および図 7 に, $V_1=100V$ 一定とした場合における $D_{fv\mu}$ に対する高調波電流特性および高調波有効電力特性を示す。図 6 より明らかなように, I_μ は $D_{fv\mu}$ にほぼ比例して増大している。このことから, 本実験条件の範囲内では, $D_{fv\mu}$ が変化した場合であっても CRM の μ 次調波に対するインピーダンスは一定と見なしてよい。 I_μ は, μ が高くなると減少しているが, μ に反比例してはいない。例えば, $D_{fv\mu}=10\%$ の場合, CRM の μ 次調波電圧に対するインピーダンスの大きさ $|Z_\mu|=|V_\mu|/|I_\mu|$ は, 1 次+3 次では 14.07Ω , 1 次+5 次では 18.74Ω , 1 次+7 次では 25.1Ω となっており, μ の増加に伴い $|Z_\mu|$ は増大している。また, 図 7 より明らかなように, μ に関わらず P_μ は $|I_\mu|^2$ の 2 乗にほぼ比例している。

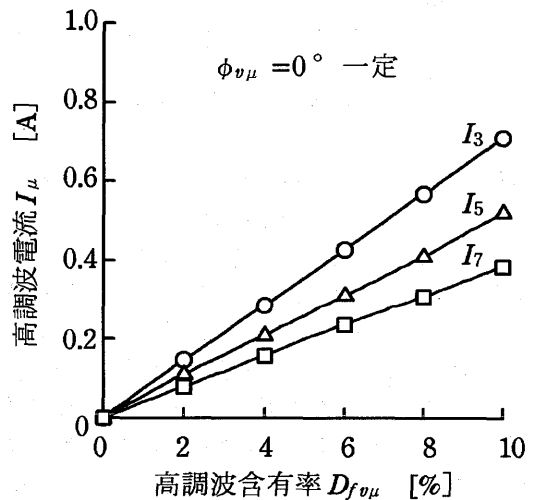


図 6 高調波含有率に対する高調波電流特性 (換気扇の場合)

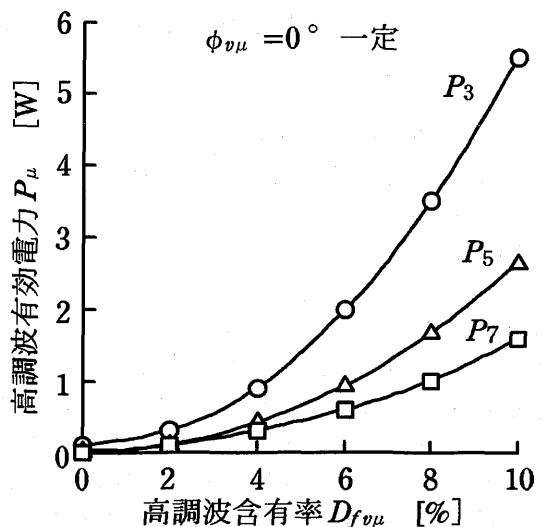


図 7 高調波含有率に対する高調波有効電力特性 (換気扇の場合)

図 8 に、一例として、印加電圧を 1 次+5 次とした場合における換気扇の各種特性について示す。同図より明かなように、 D_{fv5} が増加した場合であっても、基本波電流 I_1 および回転数 N はほぼ一定となっている。これは、 $V_1=100V$ 一定としたためである。また、 P_1 は、 V_1 が一定で I_1 がほぼ一定となっているため、 D_{fv5} が増加した場合であってもほぼ一定となっている。 pf_1 および pf_5 は、 D_{fv5} が増加した場合であっても、ほぼ一定となっている。これは、 pf_1 においては、 P_1 および I_1 が D_{fv5} に対してほぼ一定であり、 $V_1=100V$ 一定としたためである。 pf_5 においては、 P_5 が D_{fv5} の増加に伴い増大しているが、5 次調波皮相電力 $U_5=|V_5||I_5|$ および P_5 の D_{fv5} に対する増大割合がほぼ同じであるためである。例えば、 $D_{fv5}=10\%$ においては、 U_5 の増大割合が 0.62%、 P_5 の増大割合が 0.66% となっている。 pf_a においては、 P_a および全皮相電力 $U_a=|V_a||I_s|$ の D_{fv5} に対する増大割合がほぼ同じであるため、 D_{fv5} が増加した場合であっても一定となっている。

以上のように、印加電圧の全実効値を一定とした場

合、いずれの高調波電圧を基本波電圧に重ね合わせて印加した場合であっても、高調波含有率の増加に伴い主巻線の電流が増大することにより全電流は増大すること、補助巻線の有効電力は下がるが、主巻線の有効電力が増大するため、全有効電力はほとんど増大しないことなどを実験的に明らかにできた。なお、高調波の次数が低くなるほど全電流に高調波電流成分の影響が顕著に現われていることを確認している。

なお、紙面の都合上省略したが、高調波電圧の位相を変化した場合であっても、換気扇用 CRM の特性への高調波電圧の位相の影響はほとんど考慮しなくてよいことを実験的に確認している。

5. 定数決定法の工夫による特性算定精度向上に関する検討

表 3 に基本波電圧に対する表 2 の換気扇用 CRM の等価回路定数を示す。これらの定数は、文献 (8) および (9) に従い、拘束試験時の電流を定格電流とし、無負荷試験時の印加電圧を定格電圧として求めたものである。本論文では、この定数決定条件を「基準条件」と称する。なお、基本波電圧に対しては鉄損抵抗 r_i' を考慮し、高調波電圧に対しては r_i' を考慮しない ($r_i'=0$)。これは、基本波電流に対し、高調波電流は小さいため、高調波電圧に対する鉄損抵抗の解析結果に及ぼす影響はほとんど無く、特性算定を簡素化するためである。

実測結果に対する算定結果の誤差率を (7) 式のように定義し、定数決定条件の影響を検討することとした。

$$\text{誤差率} = \frac{|\text{算定値} - \text{実測値}|}{\text{実測値}} \times 100 [\%] \quad (7)$$

図 9 に正弦波駆動時における誤差率を示す。同図より明かなように、諸特性すべてにおいて、実測値より算定値が大きく算定されている。その中でも特に出力 P_0 の誤差率が 19.74% と大きい。この原因として、供試 CRM は換気扇専用モータとして設計されており、100W 程度の容量の汎用 CRM⁽⁸⁾ とは異なるた

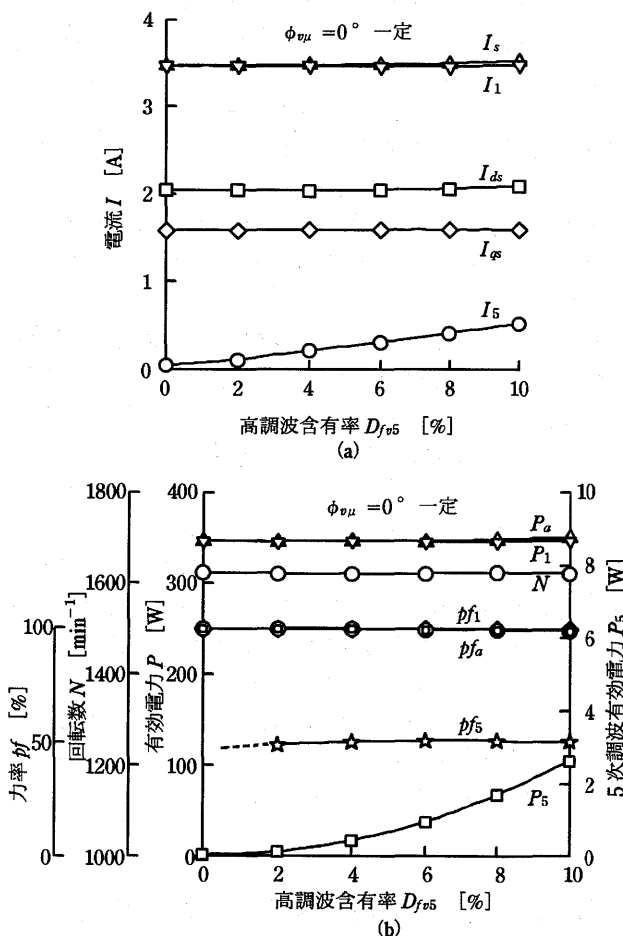


図 8 電圧ひずみ率に対する各種特性 (換気扇の場合)

表 3 等価回路定数 (換気扇用 CRM)

	基本波電圧に 対して	μ 次調波電 圧に対して
R_{ds} [Ω]	2.61	
R_{qs} [Ω]	9.49	
$x_{l1}' = x_{l2}'$ [Ω]	2.93	2.93μ
x_m' [Ω]	56.9	56.9μ
r_i' [Ω]	3.20	0*
r_2' [Ω]	5.18	
β	0.518	

*: 高調波電圧に対しては、 r_i' を考慮しない。

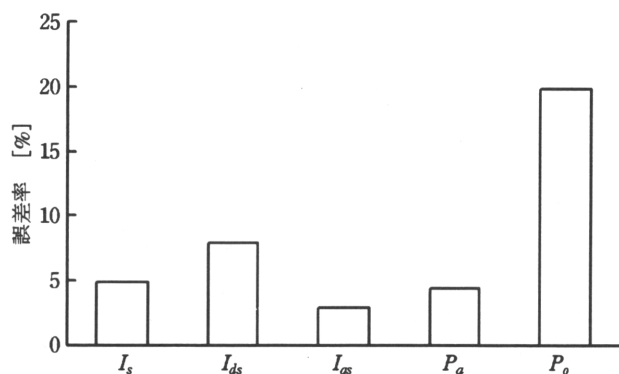


図9 換気扇用 CRM の各諸量の誤差率 (正弦波駆動時)

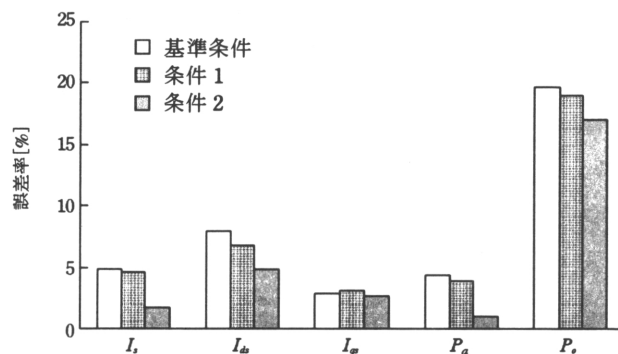


図10 定数決定条件による誤差率の比較

めと考えられる。すなわち、送風機用 CRM では自己冷却効果が高く、コンパクトに設計されているため、定格運転時において、汎用 CRM より磁気飽和の程度が大きいものと考えられる。

こうした特殊設計の CRM の特性算定精度を向上するため、等価回路定数の決定試験条件を変化させて仮定算定した結果、主巻線の拘束試験結果が特性算定精度に大きく影響していることが明らかになった。そこで、表 2 に示した有圧換気扇に対して、表 4 に示す条件で拘束試験および無負荷試験を行い、表 5 の等価回路定数を得た。表 5 の定数を用いて特性算定した場合の誤差率を図 10 に示す。「基準条件」で定数を決定して特性算定した場合、 I_s の誤差率は 4.87%、 I_{ds} では 7.91%、 I_{qs} では 2.89%、 P_a では 3.93% となる。「条件 1」とした場合、 I_s の誤差率は 4.58%、 I_{ds} では 6.83%、 I_{qs} では 3.08%、 P_a では 3.93% となり、「基準条件」の場合とほとんど変化がない。しかし、「条件 2」とした場合、 I_s の誤差率は 1.72%、 I_{ds} では 4.81%、 I_{qs} では 2.64%、 P_a では 1.09% となり、「条

件 1」とした場合よりも誤差率が小さくなる。また、「条件 2」とした場合の P_o の誤差率は 17.6% であるが、「基準条件」とした場合より小さくなっている。これは、漂遊負荷損に起因しているものと考えられるが、詳細は今後の課題としたい。

図 11 に、一例として、印加電圧を 1 次+3 次とした場合における、実測値と「条件 2」で定数を決定し特性算定した結果とを示す。同図において、プロット点は実測値、実線は特性算定値を示している。「条件 2」とした場合、同図より良好に特性算定できていることがわかる。例えば、「基準条件」とした場合、 $D_{f3}=10\%$ における I_s の誤差率は 4.21%、 I_{ds} では 6.13% であるのに対し、「条件 2」とした場合、 I_s では 1.96%、 I_{ds} では 4.71% となった。また、印加電圧を 1 次+5 次および 1 次+7 次とした場合においても、「基準条件」よりも「条件 2」で定数を決定して特性算定を行えば、各諸量の誤差率が小さくなることを確認している。

出力は、そのほとんどが基本波電圧に依存しているため、高調波含有率を増加した場合であってもほぼ一定となった。これに対して、入力、高調波含有率の増加とともに高調波有効電力が増加するため増大する。従って、高調波電圧を基本波電圧に重ね合わせて CRM に印加した場合、効率は低下する。

以上のことより、本供試機においては、拘束試験時の電流を定格電流より大きくし、無負荷試験電圧を定格電圧より高くした定数決定試験を行い、定数を求めることにより、実測値との誤差率が小さくなり、精度よく特性算定できることが明らかとなった。また、ひずみ波電圧を CRM に印加した場合、効率が低下することも理論的かつ実験的に確認できた。

6. あとがき

本論文では、送風機器（換気扇、扇風機など）用 CRM に、配電系統で問題になっている次数の低い高調波電圧を基本波電圧に重ね合わせた電圧を印加した

表4 定数決定条件 (換気扇用 CRM)

	拘束試験		無負荷試験	
	主巻線 電流	補助巻線 電流	主巻線 電圧	補助巻線 電圧
基準条件	基準値	基準値	基準値	基準値
条件 1	+10%	+10%	基準値	基準値
条件 2	+20%	基準値	+20%	+20%

「+」は基準値に対する増加を示す。

表5 回路定数比較 (換気扇用 CRM)

	基準条件	条件1	条件2
R_{ds} [Ω]	2.61	2.61	2.61
R_{qs} [Ω]	9.49	9.49	9.49
$x_{11}' = x_{12}'$ [Ω]	2.93	2.94	2.95
x_m' [Ω]	56.9	56.9	55.3
r_i' [Ω]	3.20	3.18	2.62
r_2' [Ω]	5.80	5.85	5.94
β	0.518	0.518	0.522

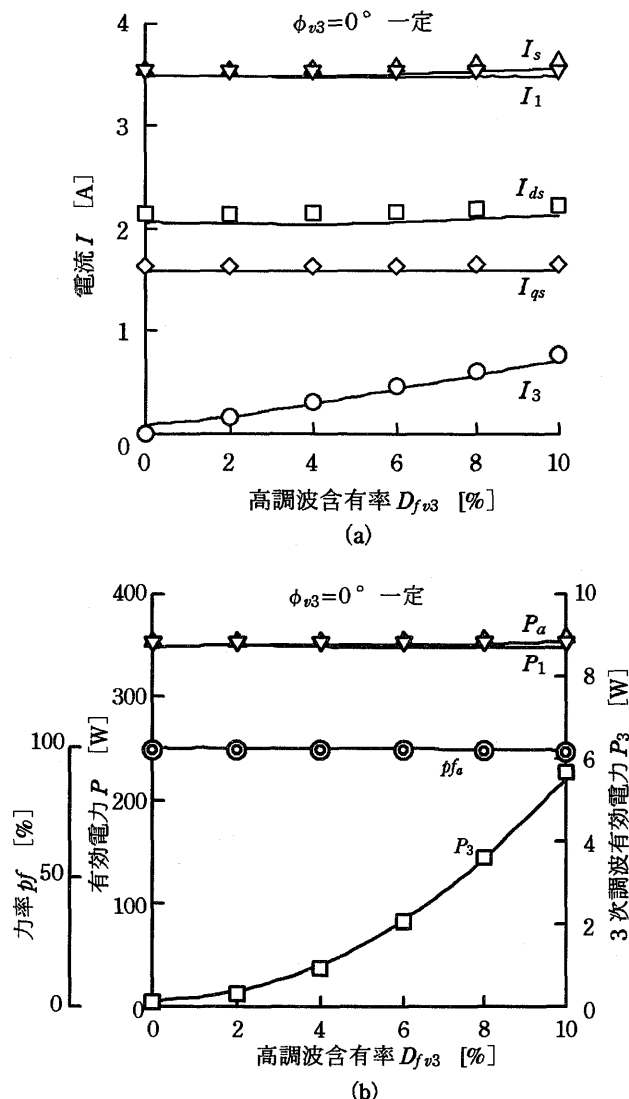


図 11 諸特性の実測値と算定値との比較 (換気扇の場合)

場合における諸特性について実験的検討を行った。また、換気扇用 CRM に対して特性算定を行ない、諸特性に与える影響を詳細に検討した。その結果、明らかになったことなどを以下に示す。

- (1) 実効値を一定として基本波電圧に高調波電圧を重ね合わせて換気扇に印加した場合、全電流は電圧ひずみ率の増加に伴いほぼ比例して増大しているが、基本波電流はほぼ一定であった。しかし、高調波電流の増大割合は高調波電圧の次数に反比例していない。全有効電力は、電圧ひずみ率を増加してもほぼ一定となるが、主巻線の有効電力は増大し、補助巻線の有効電力は減少する。従って、主巻線の温度上昇などによる影響を十分配慮する必要がある。
- (2) 基本波電圧を一定として高調波電圧を重ね合わせて換気扇に印加した場合、正弦波駆動時の特性

算定結果より、特に主巻線の定数が特性算定に影響している。また、拘束試験電流を定格電流より約 2 割大きくし、無負荷試験電圧を約 2 割高くして定数決定試験を行った結果、実測値との誤差率が小さくなり、算定精度を向上できる。これは、本論文で用いた換気扇用 CRM の磁気飽和の程度が 100W 程度の汎用 CRM⁽⁸⁾ より大きいためと考えられる。

- (3) 出力は基本波電圧にほとんど依存し、入力の基本波電圧に対する入力と高調波電圧に対する入力との和となるため、ひずみ波電圧を CRM に印加した場合、運転時の効率は低下する。

本研究成果がこの種のモータをひずみ波電源下で運転する場合の諸特性を判断する上で何がしかの寄与ができれば幸いである。

最後に、本論文を作成するに当たり、膨大な実験結果の整理などにご協力いただいた中部大学大学院工学研究科博士前期課程 山田理恵氏 (現、マスプロ電気株式会社)、同 香ノ木秀和氏 (現、草津電機株式会社)、並びに中部大学工学部電気工学科卒業研究生諸氏に深甚なる感謝の意を表します。また、電気学会全国大会などの席上にて有益なるご討論をいただいた方々に深く感謝します。

参考文献

- (1) 電気共同研究会高調波対策専門委員会：「電気共同研究電力系統における高調波とその対策」、46, 2 (平 2-6)
- (2) 電気共同研究会高調波対策専門委員会：「電力系統における高調波とその対策 ー高調波環境目標値の維持達成に関する研究ー」、電設工業 (平 2-10)
- (3) 山田・廣塚・坪井・上田：「電源電圧の波形ひずみが家電機器の特性に及ぼす影響 ー換気扇の場合ー」1997 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.225
- (4) 山田・廣塚・坪井・上田：「電源電圧の波形ひずみが換気扇の諸特性に及ぼす影響」平成 10 年電気学会全国大会, No.1045, pp.5-99
- (5) 山田・廣塚・坪井・上田：「電源電圧の波形ひずみが扇風機用モータの諸特性に及ぼす影響」平成 10 年電気学会産業応用部門全国大会, No.T-4
- (6) 山田・廣塚・坪井・上田：「電源電圧の波形ひずみが換気扇および扇風機の特性に及ぼす影響」1998 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.223
- (7) 香ノ木・廣塚・坪井・上田：「電源電圧の波形ひずみが換気扇の諸特性に及ぼす影響 ー基本波電圧一定の場合ー」平成 11 年度電気関係学会東海支部連合大会, No.201
- (8) 坪井和男：「固定子鉄損を考慮した分相型単相誘導電動機の解析」、電学論 94B, 6 (昭 49-6)
- (9) 坪井和男, 野中作太郎：「電源電圧の波形ひずみがコンデンサ電動機の特性に及ぼす影響」、電学論 97B, 3, 135(昭 52-3)