UDC 621.313.1.04.001.2

論文

53-B 89

電気機械設計の「寸法，比装荷微増加比例」の諸要素

正 員 川 田 輝 明 (ニクロン工業)

1. ま え が き

電気機械は歴史が古く、従って設計法には種々の形式がある⁽¹⁾⁽²⁾。なかでも設計法の基礎を論じ、電気装荷 A と磁気装荷 Φ とは $(A\delta\Phi)/(\Phi\delta A)=\gamma$ (一定) であることを主張した竹内氏⁽³⁾の微増加比例法は装荷設計法の代表的な説と考えられる。

微増加比例法は大正 11 年、竹内寿太郎氏により「電気機器設計の新法」と題して発表され⁽⁴⁾、その後微増加比例法の理論づけが行なわれ⁽⁵⁾現在に至っている。竹内氏微増加比例法は周知のように装荷の配分に関して、 $\Phi/A=\tau$ (一定) を説いたものであるが、筆者は設計要素 (τ, l_i, ac, B_p) について、 τ と $l_i B_p$ の分配および、 ac と τ の分配も微増加比例であり、 $l_i B_p/\tau=c_1$ 、 $\tau/ac=c_2$ 、 $c_1 c_2=c$ を指摘することができた。

この論文は設計要素にかかわる「寸法，比装荷微増加比例論」の提唱で、寸法，比装荷の実績値と理論的な値との対比を行なったものである。

本文の比例論による諸要素 τ 、 ac および $l_i B_p$ は比容量 S/f の関数として $Q=q_0(S/f)^{f(\gamma)}$ で表わされる。そして、装荷統計の実績より決めた機種別の装荷分配係数 γ を上記諸要素の $f(\gamma)$ にそれぞれ与え、計算された $f(\gamma)$ を各機種諸要素の統計に適用すると γ で決定された $f(\gamma)$ の値と q_0 を統計値とする要素の実験式は、統計の結果をよく満足させている。

なお、設計に用いる諸要素と比容量の関係は、本来理論的に算出されるものではなく、最適設計をした数多くの設計例を整理した場合に諸要素が S/f の関数関係⁽⁶⁾にあり得る。諸要素のすべてが S/f の関数関係にある必要のないことは、 l_i/τ についていえば、同一仕様の機械であっても通風冷却方式、製造設備技術

の改良および材料の進歩によって変化し、製造業者の違いによっても年代によっても変わるからである。

従って、電気機械の設計が本論文によって規定されるものでないことをあらかじめ述べておく。

本文の単位は引用文献との関係で CGS 単位が使用されている。記号説明は付録に記載した。

2. 装荷と設計要素の関係

1 極の磁束を Φ とし、1 極のアンペア回数を A とすれば、装荷と諸要素 $(\tau, l_i, ac, B_p, A_0)$ および $S_s(h/\tau)/\{1+(t/s)\}$ の関係は

$$\Phi=\alpha_i \tau l_i B_p \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$A=\frac{1}{2} \tau a c \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$=\frac{1}{2} \tau^2 A_0 \left\{ S_s \frac{(h/\tau)}{1+(t/s)} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

竹内氏⁽³⁾の微増加比例による装荷分配式は

$$\Phi=\phi_0(S/f)^{\gamma/(\gamma+1)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A=A_0(S/f)^{1/(\gamma+1)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされている。ここに

$$A_0 \phi_0 K_0 \times 10^{-9}=1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

の関係がある。

3. 寸法，比装荷微増加比例論

竹内氏⁽³⁾は、電気および磁気装荷の各々の微増加が比例するいわゆる装荷分配微増加比例法を主張し、その装荷式を(4)、(5)式のように導出した。

設計基礎の考察を微増加比例の設計思想で統一すると、微増加比例法は電気装荷と磁気装荷の分配だけでなく、 τ と $l_i B_p$ の分配および ac と τ の分配も微増加比例であることが指摘できる。

本章では寸法と比装荷の分配ならびに要素式算出の過程を説明する。まず、装荷と諸要素の基本的な関係(1)、(2)式について、次のような前提をおく。すな

Elements of "Proportional Increment for Distribution of Dimensions and Specific Loadings" to Design Electrical Machines. By Teruaki Kawada, Member (Nikuron Kogyō Co., Ltd.).
川田輝明：正員，ニクロン工業株式会社

わち、 Φ の増加をはかるには一般的方法として τ と $l_i B_\theta$ とを共に増加させる。また、 A の増加をはかる方法として ac と τ を共に増加させるものとする。

〈3・1〉 τ と $l_i B_\theta$ の分配微増加比例 (1)式において $l_i B_\theta$ を $d(l_i B_\theta)$ 増加させれば Φ は $\partial\Phi/\partial(l_i B_\theta) \times d(l_i B_\theta)$ だけ増加し、 τ を $d\tau$ 増加させれば Φ は $(\partial\Phi/\partial\tau)d\tau$ だけ増加する。

この二つの微増加分の間に一定の比を保つような比例定数 γ_1 が存在するものと仮定すれば、

$$[\partial\Phi/\partial(l_i B_\theta)]d(l_i B_\theta) = \gamma_1 (\partial\Phi/\partial\tau)d\tau$$

そして、(1)式より

$$\partial\Phi/\partial(l_i B_\theta) = \alpha_i \tau, \quad \partial\Phi/\partial\tau = \alpha_i l_i B_\theta$$

であるから、

$$d(l_i B_\theta)/l_i B_\theta = \gamma_1 (d\tau/\tau)$$

これを解くと

$$l_i B_\theta = c_1 \tau^{\gamma_1} \quad (7)$$

但し、 c_1 : 積分定数

(7)式を(1)式に入れると

$$\tau = (1/\alpha_i c_1)^{1/(\gamma_1+1)} \Phi^{1/(\gamma_1+1)} \quad (8)$$

$$l_i B_\theta = (1/\alpha_i)^{\gamma_1/(\gamma_1+1)} c_1^{1/(\gamma_1+1)} \Phi^{\gamma_1/(\gamma_1+1)}$$

$$\quad (9)$$

〈3・2〉 ac と τ の分配微増加比例 (2)式につ

いて前節と同様に

$$\left. \begin{aligned} (\partial A/\partial\tau)d\tau &= \gamma_2 [(\partial A/\partial(ac))d(ac)] \\ \tau &= c_2 ac^{\gamma_2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 γ_2 : 比例定数、 c_2 : 定数

(10)式を(2)式に入れると

$$\tau = 2^{\gamma_2/(\gamma_2+1)} c_2^{1/(\gamma_2+1)} A^{\gamma_2/(\gamma_2+1)} \quad (11)$$

$$ac = (2/c_2)^{1/(\gamma_2+1)} A^{1/(\gamma_2+1)} \quad (12)$$

〈3・3〉 寸法および比装荷微増加比例の要素式

微増加比例の装荷式は(4)、(5)式で表わされるから、(4)式を(8)、(9)式に入れると

$$\tau = (\phi_0/\alpha_i c_1)^{1/(\gamma_1+1)} (S/f)^{\gamma_1/((\gamma_1+1)(\gamma_2+1))} \quad (13)$$

$$l_i B_\theta = (\phi_0/\alpha_i)^{\gamma_1/(\gamma_1+1)} c_1^{1/(\gamma_1+1)} \times (S/f)^{\gamma_1/((\gamma_1+1)(\gamma_2+1))} \quad (14)$$

(5)式を(11)、(12)式に入れると

$$\tau = (2A_0)^{\gamma_2/(\gamma_2+1)} c_2^{1/(\gamma_2+1)} \times (S/f)^{\gamma_2/((\gamma_2+1)(\gamma_1+1))} \quad (15)$$

$$ac = (2A_0/c_2)^{1/(\gamma_2+1)} (S/f)^{1/((\gamma_2+1)(\gamma_1+1))} \quad (16)$$

(13)式=(15)式より

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \quad (17)$$

従って、 τ, ac および $l_i B_\theta$ は(18)~(20)式のように整理される。

$$\tau = \tau_0 (S/f)^{\gamma/(\gamma+1)^2} \quad (18)$$

$$ac = a_0 (S/f)^{1/(\gamma+1)^2} \quad (19)$$

$$l_i B_\theta = l_0 b_0 (S/f)^{\gamma^2/(\gamma+1)^2} \quad (20)$$

(20)式の l_i と B_θ の分割に関しては、 B_θ はほかの設計要素に比べると比較的に一定に近い範囲内の値であるから、この論文では

$$B_\theta = b_0 \text{ (一定)} \quad (21)$$

において

$$l_i = l_0 (S/f)^{\gamma^2/(\gamma+1)^2} \quad (22)$$

とする。

以上のように、微増加比例法は(Φ と A の配分)だけでなく、(τ と $l_i B_\theta$ の分配)および(ac と τ の分配)も微増加比例として論じることができる。

なお、 Δ_a と $S_s(h/\tau)/\{1+(t/s)\}$ については、電流密度を $\Delta_a = \text{const}$ において

$$\Delta_a = \delta_0 \quad (23)$$

$$S_s[(h/\tau)/\{1+(t/s)\}] = S_0 (S/f)^{(1-\gamma)/(\gamma+1)^2} \quad (24)$$

〈3・4〉 $D^2 l_i$ 式 電気機械設計の $D^2 l_i$ 式は

$$D^2 l_i = K_{ms} (\text{kVA/rpm})^M \quad (25)$$

の実験式、またはこれに準じた形式でよく知られており、理論式では従来特別な場合を仮定して $M=3/4$ または $5/6$ で求められている。

一般式に相当する理論式は、いままでに報告されていないが、この論文で得られる $D^2 l_i$ 式は一般式に相当し、 B_θ 一定として

$$D^2 l_i = K_{ms} (\text{kVA/rpm})^{\gamma(\gamma+2)/(\gamma+1)^2} \quad (26)$$

で与えられる。

4. 要素式の統計への適用

〈4・1〉 要素の統計 前章により、寸法および比装荷微増加比例の諸要素は Q を要素として

$$Q = q_0 (S/f)^{f(\gamma)} \quad (27)$$

で表わすことができた。

機種別諸要素の $f(\gamma)$ 値を求めるための分配係数 γ は、実績より得られる経験値として第1表上らんの数値を選定した。 γ を与えた各要素の $f(\gamma)$ は理論係数として第1表のように算出される。 x, y, z, u, v および w は要素別の $f(\gamma)$ を代表する記号である。

第1図~第5図は既存機械および設計例による諸要素の統計で、実験式には $f(\gamma)$ が適用されている。すなわち、対数目盛上直線のこう配が $f(\gamma)$ であり、 $Sl, f=1$ における Q の読みが実験係数 q_0 である。 q_0 の

第 1 表 設計要素の諸係数
Table 1. Coefficients of design elements for each machine.

係 数	機 種	変圧器	三相誘導電動機		交流整流子電動機			直 流 機		同期機	該当機 器なし
			かご形	巻線形	単相直巻 高速小形	単相直巻 電車用	三相直巻 ・分巻	小 形 電動機	直 流 機		
装 荷 分 配 係 数 γ (実績値)		1	1.3		1.34			1.5		1.6	2
理 論 係 数 $f(\gamma)$	磁 気 装 荷 $\gamma/(\gamma+1)$	0.500	0.565		0.573			0.600		0.615	0.667
	電 気 装 荷 $1/(\gamma+1)$	0.500	0.435		0.427			0.400		0.385	0.333
	極 ピ ッ チ $x=\gamma/(\gamma+1)^2$	0.250	0.246		0.245			0.240		0.237	0.222
	電 気 比 装 荷 $y=1/(\gamma+1)^2$	0.250	0.189		0.182			0.160		0.148	0.111
	磁 気 比 装 荷 $z=0$	0	0		0			0		0	0
	電 機 子 鉄 心 長 $u=\gamma^2/(\gamma+1)^2$	0.250	0.319		0.328			0.360		0.378	0.444
	電 流 密 度 $v=0$	0	0		0			0		0	0
	面 積 比 $w=(1-\gamma)/(\gamma+1)^2$	0	-0.057		-0.062			-0.080		-0.089	-0.111
	寸 法 比 $u-x=\gamma(\gamma-1)/(\gamma+1)^2$	0	0.073		0.083			0.120		0.142	0.222
	機 械 寸 法 $2x+u=\gamma(\gamma+2)/(\gamma+1)^2$	0.750	0.811		0.817			0.840		0.852	0.888
実 験 係 数 q_0	基準磁気装荷 $\phi_0(\times 10^6)$	0.29	0.28	0.31	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.30	
	基準電気装荷 $A_0(\times 10^3)$	0.78	0.85	0.77	0.95	0.95	0.76	0.69	0.78	0.79	
	機器の係数 $K_0=10^3/(\phi_0 A_0)$	4.4	4.2	4.2	3.19	3.19	4.1	4.5	4.0	4.2	
	極 弧 比 α_i	0.35	0.637	0.637	$(2\sqrt{2}/k_c)$ 0.64	$(2\sqrt{2}/k_c)$ 0.75	0.637	$(4/k_d)$ 0.60	0.70	0.74	
	極 ピ ッ チ τ_0	11.5	10.3	9.2	12.2	8.4	10.0	15.1	11.0	10.2	
	電 気 比 装 荷 a_0	136	165	167	156	226	152	92	142	155	
	磁 気 比 装 荷 b_0 (変圧器では b_{0c})	12,500	6,010	6,010	5,090	6,630	5,700	4,400	7,400	7,600	
	電 機 子 鉄 心 長 l_0	6.4	7.1	8.8	8.3	7.9	8.8	8.0	5.6	5.2	
	電 流 密 度 δ_0	300	400	400	800	450	430	400	400	350	
	面 積 比 $S_0=a_0/(\tau_0 \delta_0)$	0.039	0.040	0.045	0.016	0.060	0.035	0.015	0.032	0.043	
	寸 法 比 $m_0=l_0/\tau_0$	0.50	0.69	0.95	0.68	0.94	0.88	0.53	0.51	0.51	
	機 械 寸 法 $\tau_0^2 l_0$	850	750	750	1,230	560	880	1,820	680	540	

注: (1) 要素の一般式 $Q=q_0(S/f)^{f'}$ (2) $k_c=(\text{電機子端子電圧})/(\text{電源電圧})=0.886$, $k_d=\text{電機子巻線の電圧降下}=0.888$
(3) 変圧器の m_0 は $(0.9l_0)/\tau_0$

(a) 変圧器設計要素 ($B_c, \Delta a, ac$) の統計
(a) Relation between S/f and design elements ($B_c, \Delta a, ac$) in transformers.

(b) 変圧器設計要素 ($\tau, l_i, 0.9l_i/\tau$) の統計
(b) Relation between S/f and design elements ($\tau, l_i, 0.9l_i/\tau$) in transformers.

第 1 図

Fig. 1.

統計的平均値は第 1 表のようになる。

〈4・2〉 使用したデータの仕様と最近の機器 統計に使用したデータの大部分は国内の関係書籍，文献記載によるものを引用したが，機種によってはかなり古い年代のものもある。従って，今回使用したデータの γ および統計的平均値 q_0 は，最近製作された機械

の統計から求められる γ および q_0 とは値が相違していることもあり得る。しかし，今回の機種別に選定された γ は，各要素についての $f(\gamma)$ と各要素についての統計がなるべく一致するように決めた γ であるから，第 1 表で選定した機種別の γ は今回使用したデータに関しほぼ妥当と考えられる。

第2図 三相誘導電動機設計要素 (B_g , Δ_a , ac , τ , l_i/τ) の統計

Fig. 2. Relation between S/f and design elements (B_g , Δ_a , ac , τ , l_i/τ) in three-phase induction motors.

(a) 交流整流子電動機設計要素 (B_g , Δ_a , l_i/τ) の統計
(a) Relation between S/f and design elements (B_g , Δ_a , l_i/τ) in single-phase high-speed small-sized motors, traction motors and three-phase commutator motors.

(b) 交流整流子電動機設計要素 (ac , τ , l_i) の統計
(b) Relation between S/f and design elements (ac , τ , l_i) in single-phase high-speed small-sized motors, traction motors and three-phase commutator motors.

第3図
Fig. 3.

(a) 直流機設計要素 (B_g , Δ_a , ac) の統計
(a) Relation between S/f and design elements (B_g , Δ_a , ac) in DC machines and two pole small-capacity DC motors.

(b) 直流機設計要素 (τ , l_i , l_i/τ) の統計
(b) Relation between S/f and design elements (τ , l_i , l_i/τ) in DC machines and two pole small-capacity DC motors.

第4図

Fig. 4.

統計* は電圧階級, 絶縁階級, 温度上昇限度, 冷却方式, 特性などを異にした多数の機械の平均を求めたものであり, 同一の比容量でも諸要素にかなりの違いがみられる。ゆえに本文の表, 図の適用できる仕様は集録したデータの機械の設計年代における値を勘案した範囲内のものとなる。

最近の機械の傾向は設計製作技術の進歩, 材料および処理, 冷却法などの改良により, 装荷分配の比率が電気装荷の大きい銅機械の傾向にある。製作技術と材料の進歩はスロット占積率 S_s を高め, スロットの深さ h は直流機では整流作用の改善, 同期機では突発短絡電流の制限, 自動電圧調整器の発達によって漏れ

*: この論文の統計に採用した資料の主な出所を文献番号で記しておく。

第1図 変圧器: (2), (3), (7)~(9), 第2図 三相誘導電動機: (2), (3), (8)~(13), 第3図 交流整流子電動機: (8), (13)~(16), 第4図 直流機: (3), (7)~(9), (12), (14), (17)~(19), 第5図 三相同期機: (3), (8), (10), (12), (14), (17), (19), (20)

(a) 三相同期機設計要素 ($B_g, \Delta_a, ac, l_i/\tau$) の統計
(a) Relation between S/f and design elements ($B_g, \Delta_a, ac, l_i/\tau$) in three-phase synchronous machines.

(b) 三相同期機設計要素 (τ, l_i) の統計
(b) Relation between S/f and design elements (τ, l_i) in three-phase synchronous machines.

第 5 図

Fig. 5.

リアクタンスは増大, 従って電機子直径に対して大きくなる傾向にある。また, けい素鋼板の品質向上は電機子歯の磁束密度が大きくとれるから, 歯の幅は小さく, スロット幅は大きくなり, B_g の増加と l_i の減少にかかわりを与えている。

冷却法の進歩改善により電流密度 Δ_a も高くとれるから, $S, \Delta_a(h/\tau)/\{1+(t/s)\}$ すなわち ac/τ は必然的に増加の傾向にある。

当面, 分配係数 γ の変化は微少であり, 基準電気比装荷 a_0 (仮称) および基準磁気比装荷 b_0 (仮称) が大きくとられているとみるべきが妥当である。

* * *

5. むすび

電気機械設計の微増加比例法は装荷の分配だけでなく, 寸法と比装荷の分配も微増加比例であることを論じ, 「寸法, 比装荷微増加比例論」を提唱した。この比例論による設計要素式は $Q = q_0 (S/f)^{\gamma}$ で表われ, 統計の実験式をよく満足させている。

本文では, 磁気比装荷 B_g を一定として展開したが実際問題として B_g は S/f の大きい機械ほど大きく採られているのが通例で, 実験式は $B_g = b_0 (S/f)^z$ の形式で求められている⁽⁶⁾。この場合には本論文での l_i の係数は $\{\gamma/(\gamma+1)\}^{2-z}$ で与えられる。

(昭和 50 年 7 月 31 日受付, 同 53 年 1 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 藤田: 電学誌 62, 23 (昭 17-1)
- (2) 執行: 電気機械設計論 1, 143 (昭 27)
- (3) 竹内: 電気機器設計学 (昭 23)
- (4) 竹内: 電学誌 p. 711 (大 11-10)
- (5) 竹内: 電学論 2, 379 (昭 16-11)
- (6) 今川: 電学誌 70, 322 (昭 25-8)
- (7) 高橋: 電気機器設計 I (昭 27)
- (8) 上田・村山: 電気機械設計 (昭 24)
- (9) 笠原: 電機設計と工作法 p. 44 (昭 28)
- (10) 高橋: 電気機器設計 II (昭 31)
- (11) 日野: 三相誘導電動機 p. 286 (昭 26)
- (12) M. Walker: *Dynamo-Elect. Mach.* (1918)
- (13) 執行: 電気機械設計論 2 (昭 26)
- (14) リヴシツ, 原著: 電気機械 3 (昭 15)
- (15) 日本国有鉄道交流電化調査委員会資料: 単相交流整流子電動機 (昭 31-3)
- (16) 川田: 電学論 B 92, 406 (昭 47-7)
- (17) 執行: 電気機械設計論 3 (昭 26)
- (18) 小形回転機ハンドブック p. 13 (昭 34)
- (19) 今川: 電学誌 71, 71 (昭 26-2)
- (20) 土師: 同期機 476 (昭 26)

付 録

記号説明

- A : 毎極電気装荷 (AT/P)
 A_0 : 毎極基準電気装荷 (AT/P)
 ac : 電気比装荷 (電機子円周上 1cm あたりのアンペア導体数), 変圧器では巻線高さ 1cm あたりの AC
 B_g : 磁気比装荷 (エアギャップにおける磁束密度最高値 (G))
 B_c : 変圧器鉄心の磁束密度最大値 (G)
 C_c : 変圧器巻線の占積率
 D : 電機子ギャップ直径 (cm)
 f : 100 を単位とした回転または電源周波数 [f (Hz)/100]
 h : 電機子スロット深さ, 変圧器巻線層の厚さ

(cm)	α_i : (極弧の長さ)/(極ピッチ), 変圧器では(鉄心の幅)/(窓の高さ)
K_0 : 電気機器の係数 (4 または $4.44K_{w1}$)	γ : 装荷の分配係数
K_{w1} : 巻線係数	Δ_a : 巻線の電流密度 (A/cm ²)
l_i : 電機子鉄心有効長, 変圧器の鉄心厚さ (cm)	τ : 極ピッチ ($=\pi D/P$), 変圧器窓の高さ (cm)
m : 寸法比 (l_i/τ), 変圧器では鉄心の占積率を 0.9 として ($0.9l_i/\tau$)	Φ : 毎極磁気装荷 (最大磁束数) [(マクスウェル/P)]
P : 極数, 変圧器では脚数	ϕ_0 : 毎極基準磁気装荷 [(マクスウェル/P)]
S : 毎極皮相容量 (kVA/P)	$S_s(h/\tau)/\{1+(t/s)\}$: (スロットピッチあたりの導体面積)/(極ピッチ)
S_s : スロットに収まる導体占積率	変圧器の装荷式: $\Phi=(\alpha_i\tau)(0.9l_i)B_c$, $A=(1/2)\tau^2\Delta_a$
s : スロットの幅 (cm)	$\{C_c(h/\tau)\}$, $ac=\tau\Delta_aC_c(h/\tau)$
S/f : 比容量 (kVA/P $\cdot$ 100/f (Hz))	
t : 電機子の歯の幅 (cm)	