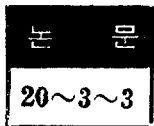


자기증폭기의 시형설계 및 동작특성

Design and Characteristics of Magnetic Amplifier



현 경 호* 오 명 환* 이 광 원*

(Kyung Ho Hyun, Myung Hwan Oh, Kwang Won Lee)

[ABSTRACT]

An experimental design of magnetic amplifiers and their characteristics in steady state are presented.

A saturable reactor model having 2KVA capacity was designed, using Z-10 grain-oriented silicon steel which is commonly used in power transformers. Experimental and theoretical analysis show that the experimental results are in good agreement with the equal ampere-turns law.

In addition to the saturable reactor, the self-saturated magnetic amplifiers of 0.4VA and 5VA capacity, using 50% Ni-Fe alloy cores having rectangular hysteresis loops were designed. Control characteristic curves of these amplifiers show high ampere-turn gain enough to be used for voltage controllers under load and non-contact magnetic switches of the rated capacity.

1. 서 론

자기증폭기는 가포화리액터(saturable reactor)를 단독으로 사용하거나 혹은 다른 회로부품을 병용하여 증폭작용이나 제어작용을 행하는 장치로서, 이에 관한 연구는 1901년 Burgess와 Frankenfield⁽¹⁾에 의하여 최초로 시작되었다. 그후 1919년에는 Jonas⁽²⁾에 의하여 처음으로 자기피드백형 자기증폭기 (self-saturated magnetic amplifier)가 개발되었으며 1959년까지는 연간 수십편씩의 연구논문과 특허가 발표된 바 있다.^(3~4)

가포화리액터는 철심의 자기포화특성과 등암페어턴의 법칙⁽⁵⁾ (law of equal ampere-turns)을 이용하여 독립된 직류제어자화력을 변화시킴으로써 1000KW급 교류대전력을 제어할 수 있으므로 조명제어장치나 전동기의 속도제어장치등에 많이 이용된다.

피드백형 자기증폭기⁽⁶⁾ (feedback-type magnetic amplifier)는 피드백회로와 정류기를 이용하여 출력의 일부 혹은 전부를 제어자화력으로 피드백시킴으로써 고증폭특성을 갖도록 한 것이며, 피드백방식에 따라서 외부피드백형(external feedback type)과 자기 피드백형 (internal feedback type 혹은 self-saturated type)등으로 분류된다.⁽⁷⁾ 자기피드백형 자기증폭기는 보통 암페어턴증폭도가 수십 내지 수백에 달하므로

증폭단수를 여러개로 사용할 경우에는 광전지나 열전대 등으로부터 나오는 $10^{-16}W$ 급 소전력을 증폭할 수 있다.

자기증폭기는 정류기부분을 제외하면 그 구조가 견고하고 내열성이 좋기 때문에 충격이나 가열상태에서도 동작되므로 저주파제어용 자동제어장치로서 크게 이용되어 왔다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 Z-10 방향성규소강판을 철심으로 이용한 2KVA급 가포화리액터를 설계제작하고 그 제어특성을 실험하였으며 이론적인 암페어턴의 값과 실측치가 동일함을 확인하였다. 또한 자기이력곡선이 구형에 가까운 50% 니켈강판을 철심으로 사용하여 0.4VA 및 5VA급의 시형자기증폭기를 실험실에서 제작하였으며 증폭특성실험을 통하여 시작품의 암페어턴증폭도가 $K_{AT}=250\sim 400$ 임을 확인하였다. 따라서 본 연구의 결과로써 제작된 시형 자기증폭기는 $\frac{1}{120}$ 마력급 직류전동기의 속도제어장치 및 0.4~5W급 무접점자기스위치로 이용할 수 있으며, 시형 2KVA급 가포화리액터로서는 2마력급 전동기의 속도제어나 2KW급의 조명조절이 가능하다.

* 경희원 : 한국과학기술연구소 전기기기연구실

2. 기본회로 및 원리

그림 1과 같은 직렬형 가포화리액터의 경우 리액터의 동작상태는 자유자화상태와 구속자화상태로 구분된다.⁽⁹⁾ 자유자화상태에서는 저항부하의 경우 $R_{CT} \ll n^2 R_L$ 이므로 부하전류는 그림 2와 같은 파형이 되며 점호각⁽⁶⁾ (firing angle)의 크기에 관계없이 등암페어턴의 법칙 $N_C I_L = N_C I_C$ 가 성립한다. 또한 구속자화상태에서는 $R_{CT} \gg n^2 R_L$ 이므로 부하전류의 파형은 그림 3과 같이 되고 역시 등암페어턴의 법칙을 만족한다. 리액터의 임계포화전압은 직렬형 회로의 경우 $E_0 = 8.88 f N_C \phi_0$ 가 되며⁽¹⁰⁾ 전원전압이 임계포화전압보다 크면

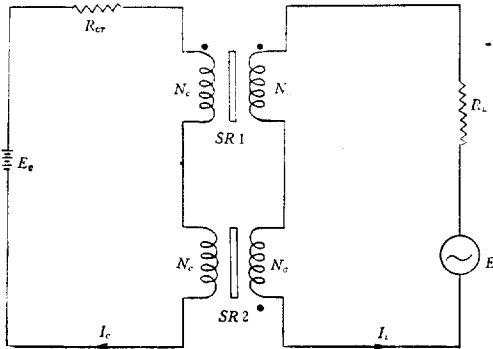


그림 1. 직렬형 가포화 리액터의 회로도
Fig. 1 Circuit of series-connected saturable reactor

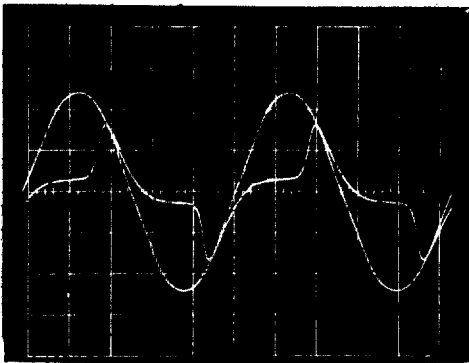


그림 2. 자유자화시의 가포화리액터의 전압-전류 파형
Fig. 2 Oscillogram of supply voltage and load current in natural-magnetization condition, occurring in the circuit of Fig. 1

제어전류가 0 일 때에도 $\frac{1}{1.11} \cdot \frac{E-E_0}{R_L}$ 만큼의 포화전류가 흐른다. (그림 4 참조) 이때 1.11은 전원전압의 파형율이다.

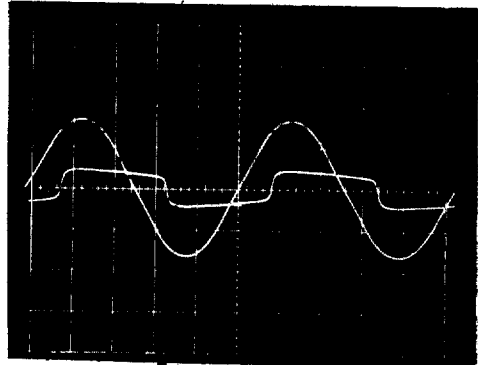


그림 3. 구속자화시의 가포화리액터의 전압-전류 파형
Fig. 3 Oscillogram of supply voltage and load current in forced-magnetization condition, occurring in the circuit of Fig. 1.

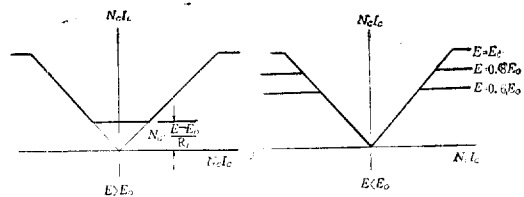


그림 4. 전원전압의 변동에 따른 가포화리액터의 제어특성곡선
Fig. 4. Control characteristic curves with variable voltages in saturable reactor

또한 그림 5와 같은 병렬형 회로에서는 리액터의 동작상태가 항상 자유자화 상태이고 부하전류와 제어전류의 파형은 그림 6과 같다. 임계포화전압은 $E_0 = 4.44 f N_C \phi_0$ 로서 직렬형의 1/2 이 되며 부하전류는 직렬형의 2 배가 되고 $N_C I_L = 2 N_C I_C$ 가 성립한다.

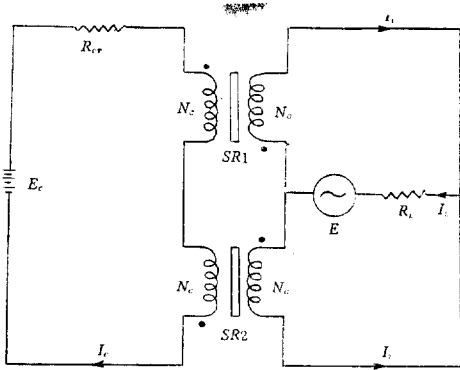


그림 5. 병렬형 가포화리액터의 회로도
Fig. 5 Circuit of parallel-connected saturable reactor

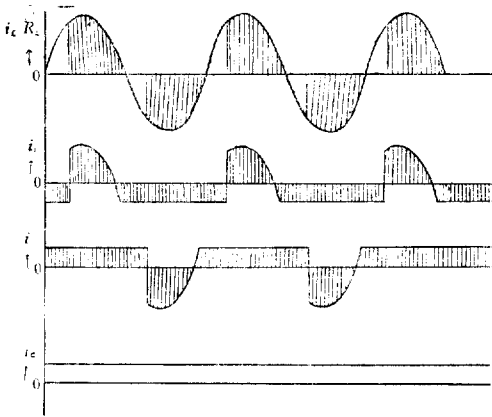


그림 6. 병렬형 가포화리액터의 전압-전류 파형
Fig. 6 Wave shapes for parallel-connected saturable reactor shown in the circuit of Fig. 5

한편 철심의 자화특성이 이상적이라면 코어게인⁽¹⁰⁾ (core gain) K_C 는 무한대이므로 자기피드백형 자기증폭기의 증폭도는 무한대로 되어야 한다. 그러나 모든 철심재료의 코어게인이 유한치이고⁽¹¹⁾ 피드백정류기의 역방향전류가 미소하나마 0이 안되기 때문에 실제의 증폭특성은 그림 7과 같이 된다. 여기에서 R_d 는 철심의 동저항(dynamic resistance)으로서 불포화상태에서의 철심의 전압흡수률 나타낸다.⁽¹¹⁾

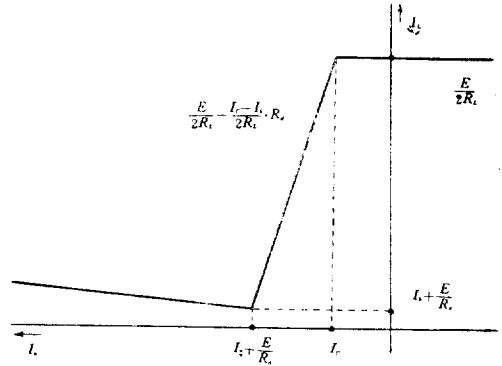


그림 7. 자기피드백형 자기증폭기의 증폭특성곡선(반파형회로)
Fig. 7 Current amplification characteristic curve in half wave self-saturated magnetic amplifier.

3. 실험방법

가포화리액터의 철심재료로서는 그림 8과 같은 자화특성을 갖는 0.3mm 두께의 Z-10 방향성규소강판을 적층하여 사용하였다. 철심창구면적 및 철심단면적의 계산은 茂木⁽¹⁰⁾의 설계방식대로 가포화리액터의 출력을 고려하여 행하여 졌으며 권선수의 계산 및 그 설계결과치는 표1과 같다. 제작된 시형의 외형은 그림 9에도 시되었다.

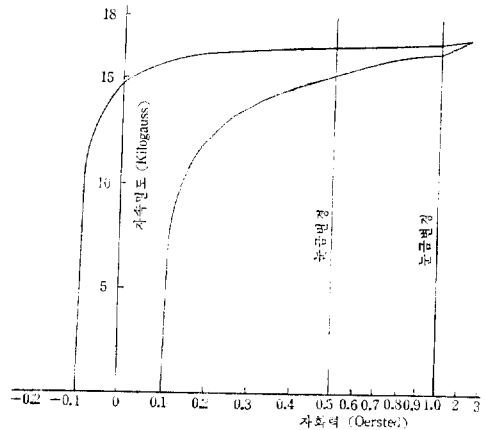


그림 8. Z-10 규소강판의 직류자기이력곡선 ($B_m=17KG$)
Fig. 8 DC hysteresis loop of Z-10 silicon steel ($B_m=17KG$)

표 1. 시험 가포화리액터의 설계결과

Table 1. Data for design calculations of saturable reactor test models

공 명 식	가 포 화 리 액 터		출 력 : 1.8[KVA]		주 파 수 : 60[Hz]				
철심재료 : 0.3mm 두께의 방향성 Z-10 규소강판									
철심형태 : 절 단 형 권 철 심			단면적(GA) : 18.85[cm ²]		절 적 율 : 0.95				
창 면 적 : 3.7×9.6[cm ²]			철심의 자로 : 35.7[cm]		B _r : 17[kg]				
권 선 명	전 압	권 선 수	권 선 굵 기	권 선 종 류	전 류	권 선 장	권 선 관 내 경	권 선 총 수	1 권 평 장
출 력 권 선	60[V]	80	1.2×4.5[mm ²] 구	DEE 선	15[A]	8.6[cm]	3.3[cm]× 7.5[cm]	11	26.2[cm]
케 환 권 선	15[V]	20	상 동	상 동	15[A]	상 동	상 동	3.5	상 동
제 어 권 선	24[V]	1,200	0.8φ 환 형	DE 선	1 [A]	상 동	11cm× 13cm	13.5	54[cm]
바이 어 스 권 선	6[V]	400	상 동	상 동	1 [A]	상 동	상 동	5.5	상 동

기타 (1) 출력권선과 케환권선간에는 0.13mm 크라프트지 2회 케환권선과 제어권선간에는 0.25mm 크라프트지 2회, 제어권선과 바이어스 권선간에는 0.13mm 크라프트지 2회의 절연을 실시함.

(2) 램프드선은 각각 50 cm 인출함.

(3) 권선간은 1.5mm~2.0mm 두께의 것을 사용함.

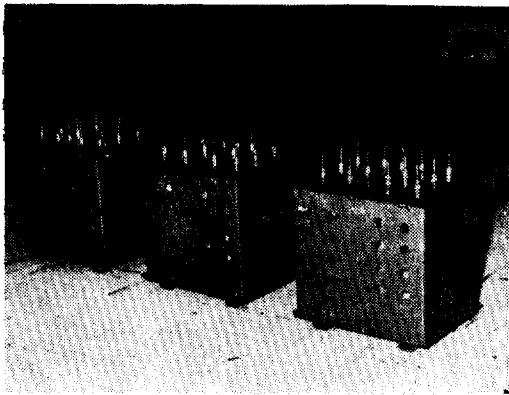


그림 9. 시험 가포화리액터 (1.8KVA)

Fig. 9 Saturable reactor models having 1.8 KVA capacity

자기피이드백형 자기증폭기의 철심은 구형자기이력 곡선을 갖는 방향성 50% 철-니켈합금강판을 환상으로 감아서 제작한 환형철심 (toroidal-wound core)으로서, Hubbard 와 Bishop⁽¹²⁾ 및 Bedford, Willis와 Dodson⁽¹³⁾ 등이 제안한 최적크기의 형태를 갖는 것으로 선택하였다. (그림 10 참조)

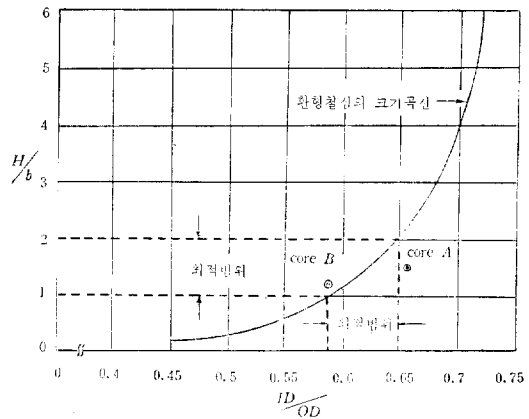


그림 10. 환형철심의 최적형태와 철심시료의 크기

Fig. 10 Shapes of toroidal cores used for magnetic amplifier models.

증폭기의 설계자료로서 필요한 철심시료의 자기이력 곡선 및 정전류자속리셋트특성의 측정에는 AIEE Committee⁽¹⁴⁾가 제안한 CCFR 시험방식과 SCE 시험방식을 이용하였으며 그 측정결과가 그림 11, 그림 12, 그림 13, 및 그림 14에 나타나 있다.

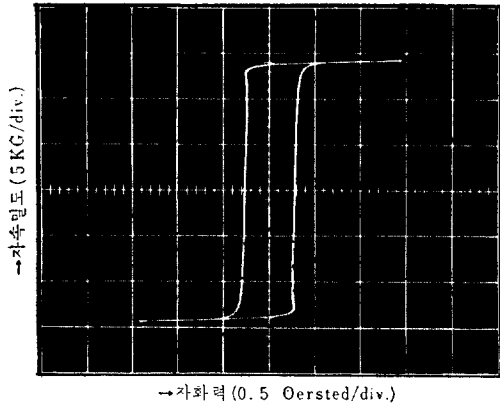


그림 11. 시료 A (Deltamax)의 자기이력곡선 (AC 60Hz)

Fig. 11 Oscillogram showing hysteresis loop of core A (Deltamax) at 60Hz

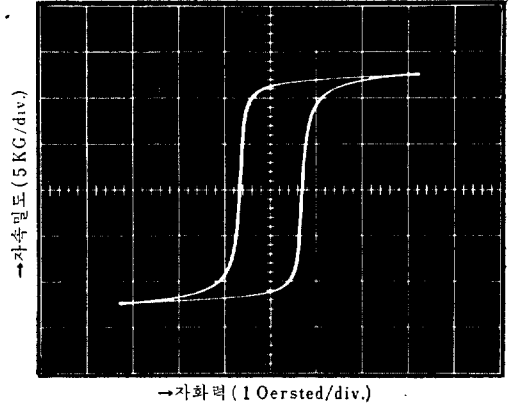


그림 13. 시료 B (Hipernik)의 자기이력곡선 (AC 60Hz)

Fig. 13 Oscillogram showing hysteresis loop of core B (Hipernik) at 60Hz

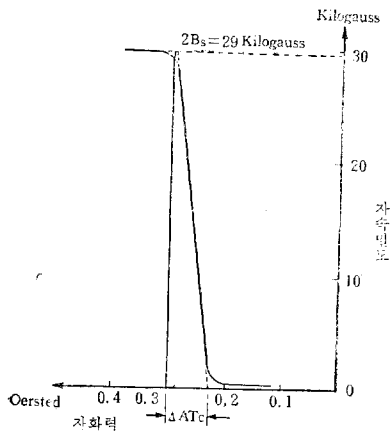


그림 12. 시료 A (Deltamax)의 정전류자속리셋 특성

Fig. 12 Constant-current flux-reset characteristics of core A (Deltamax)

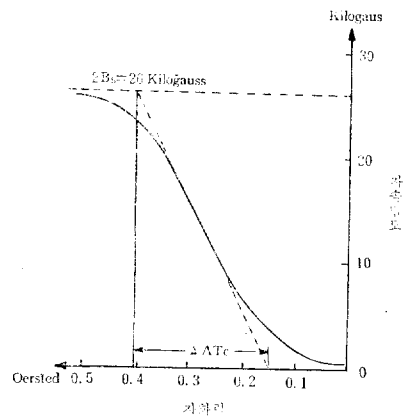
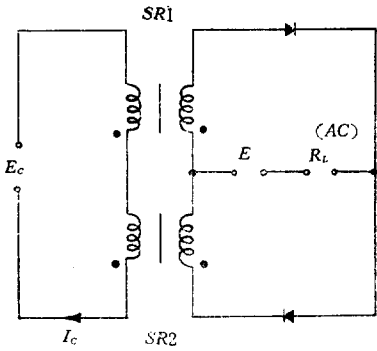


그림 14. 시료 B (Hipernik)의 정전류자속리셋 특성

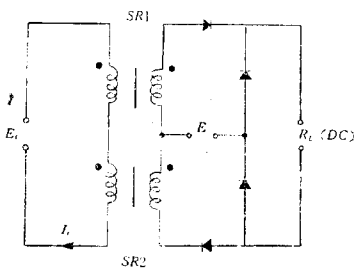
Fig. 14 Constant-current flux-rest characteristics of core B (Hipernik)

그림 15의 다블러형 (doubler-type) 및 그림 16의 전파브리지형 (full-wave bridge-type) 자기증폭기의 설계 를 위하여 Anderson⁽¹⁵⁾의 계단적설계법 (step-by-step designing method)을 이용하였으며 그 설계결과치는 표 2와 같다.



SR1, SR2 $\begin{cases} N_C=1200(0.4\phi \text{에 나뉠 동선}) \\ N_C=320(0.8\phi \text{에 나뉠 동선}) \end{cases}$

그림 15. 시형 B 다블러형 자기증폭기의 회로도
Fig. 15 Circuit of test model B as a doubler-type magnetic amplifier.



SR1, SR2 $\begin{cases} N_C=500(0.3\phi \text{에 나뉠 동선}) \\ N_C=100(0.14\phi \text{에 나뉠 동선}) \end{cases}$

그림 16. 시형 A 전파브리지형 자기증폭기의 회로도

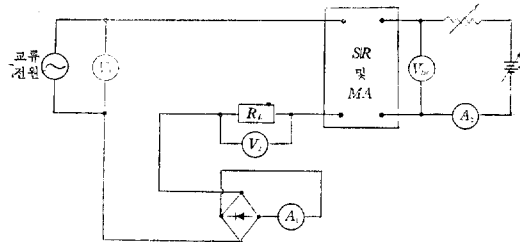
Fig. 16 Circuit of test model A as a full-wave bridge-type magnetic amplifier.

표 2. 시형 자기증폭기의 설계결과
Table 2. Data for design calculations of self-saturated magnetic amplifier test models

설 계 항 목	시 형 A	시 형 B	
회 로 형 태	전파브리지형	다 블 러 형	
출 력 력	0.4VA	5VA	
전 원 전 압	4Volt	24Volt	
사 용 주 파 수	60Hz	60Hz	
부 하 저 항	10Ω	20Ω	
부하 전류(평균치)	200mA	500mA	
제 어 전 류 의 폭	5mA	15mA	
재 료	Deltamax강	Hipernik강	
포화자속밀도	$B_s=14.5\text{KG}$	$B_s=13\text{KG}$	
철심	A_w	2.34cm ²	4.27cm ²
	A_{F_s}	0.21cm ²	0.6cm ²
	l_{F_s}	6.99cm	9.97cm
출력 권선	권 선 수	500회	1,200회
	합 기	AWG29	AWG27
	권선전류(평균치)	140mA	350mA
제어 권선	권 선 수	100회	320회
	합 기	AWG36	AWG40
	권선 전 류	15mA	15mA
캐 환 용 경 류 기 규 격	10V500mA급	50V1A급	
권 선 간 절 연	없음	0.15mm 절연테이프	

한편 자기증폭기의 특성시험에 관한 표준규정(16~17)에 따라서 본 연구과정에서는 리액티의 극성시험, 권선비시험, 권선저항의 측정, 절연내력시험등을 행하였으며 자기증폭기의 동작특성시험을 실시하였다.

리액티의 시험회로는 변압기의 경우와 동일하게 구성하였으며 자기증폭기의 동작특성 시험회로도는 그림 17과 같이 구성하였다.



※ A₁ 과 A₂ 는 평균치 전류계임.

그림 17. 자기증폭기의 동작특성 시험회로도
Fig. 17 Control-characteristics test circuit of magnetic amplifier.

4. 실험결과

리액터의 극성시험과 권선비시험은 제작시에 실시한 결과 최초의 설계치와 동일하였다. 절연내력시험은 시험용 가포리액터에 대해서만 실시하였는데 AC 300 volt에서 1분간 절연파괴현상이 없었으므로 JIS 규격⁽¹⁷⁾에 합격되었다. 권선저항은 연구실의 임피던스 브리지(GR-type No. 1608-A)를 사용하여 측정하였으며 그 측정결과는 표3과 같다.

표 3. 시험 증폭기들의 권선저항 측정결과
Table. 3 Winding resistances of amplifier models

권선	가포화 리액터			자기피이드백형 자기증폭기	
	시험1	시험2	시험3	시험 A	시험 B
출력 권선	0.115	0.118	0.117	4.1	9.6
케 환 권선	0.065	0.066	0.065	없 음	없 음
제 어 권선	22.14	22.21	22.16	3.8	108.4
바이어스 권선	8.15	8.20	8.18	없 음	없 음

※ 주 : 권선저항은 리액터 2개의 평균치임.

자기증폭기의 동작특성시험결과 시험용 가포화리액터는 그림 18과 그림 19에서 볼 수 있는 바와 같이 경계 부하저항 $R_L=8\Omega$ 과 $R_L=2\Omega$ (병렬형 일 때)시에 등압페어턴법칙을 만족하였고 전류증폭도가 $K_L \approx 15$ 로서 설계사양과 일치하였다. 따라서 가포화리액터의 권선비를 크게 하면 크게 할수록 전류증폭도는 증대된다.

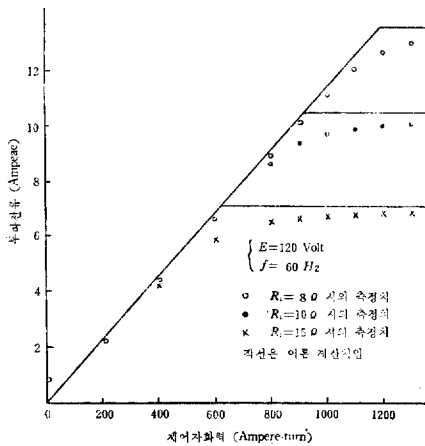


그림 18. 직렬형 가포화리액터의 제어특성(시작품 3개의 평균치)
Fig. 18 Load currents as a function of control ampere-turns in series-connected saturable reactor (mean values for three test models)

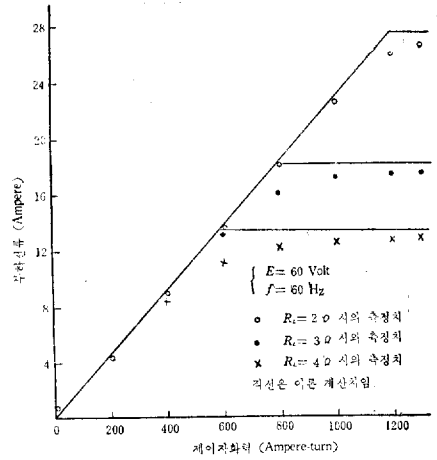


그림 19. 병렬형 가포화리액터의 제어특성(시작품 3개의 평균치)
Fig.19. Load currents as a function of control ampere-turns in parallel-connected saturable reactor (mean values for three test models)

또한 전압특성곡선 (그림 20과 그림 21참조)에서 볼 수 있는 바와 같이 전원전압이 임계포화전압 ($E_0=120$ Volt, 병렬형에서는 $E_0=60$ Volt)보다 커지면 제어전류가 $I_c=0$ 일 때에도 $\frac{1}{1.11} \cdot \frac{E-E_0}{R_L}$ 에 해당되는 전류가 흐름을 실험적으로 확인하였다. 그러므로 동작전압은 임계포화전압이하로 인가하여야 함을 알 수 있었다.

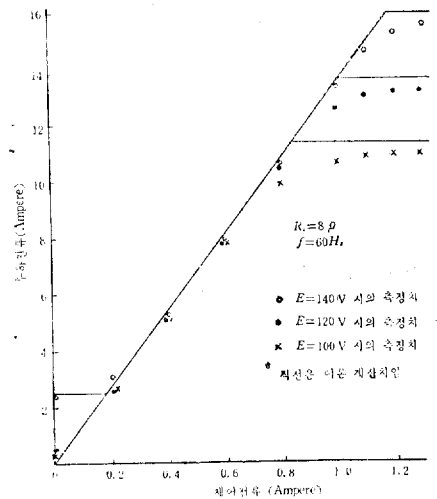


그림 20. 직렬형 가포화리액터의 전압특성(시작품 3개의 평균치)
Fig. 20 Load currents vs. control currents with variable voltages in series-connected saturable reactor (mean values for three test models)

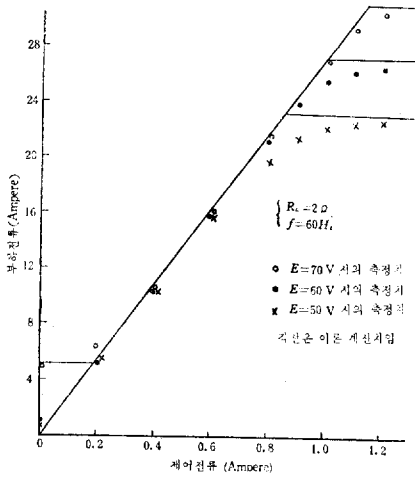


그림 21. 병렬형 가포화리액터의 전압특성 (시작품 3개의 평균치)

Fig. 21 Load currents vs. control currents in parallel-connected saturable reactor (mean values for three test models)

또한 시험 자기증폭기의 제어특성 (그림 22, 그림 23, 그림 24, 및 그림 25 참조)으로부터 알 수 있는 바와 같이 암페어턴 증폭도는 정격부하저항 $R_L=10\Omega$ (시험 A)과 $R_L=20\Omega$ (시험 B)시에 각각 $K_{AT}=380$ (시험 A) 및 $K_{AT}=250$ (시험 B)로서 시험 A의 증폭도가 더 크다. 이것은 그림 12와 그림 14에서 산출할 수 있는 바와 같이 시험 A의 코어게인 K_C 가 시험 B보다 더 크기 때문이다.

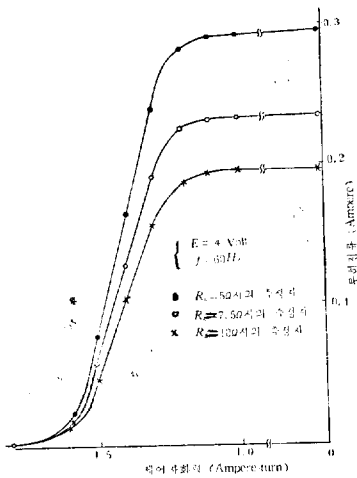


그림 22. 시험 A 자기피이드백형 자기증폭기의 제어특성.

Fig. 22 Load currents vs. control ampere-turns of test model A self-saturated magnetic amplifier.

정격전압은 시험 A의 경우 $E_0=4\text{Volt}$ 이고 시험 B의 경우 $E_0=24\text{ Volt}$ 로서 실제정격치와 동일함을 실험적으로 확인하였다.

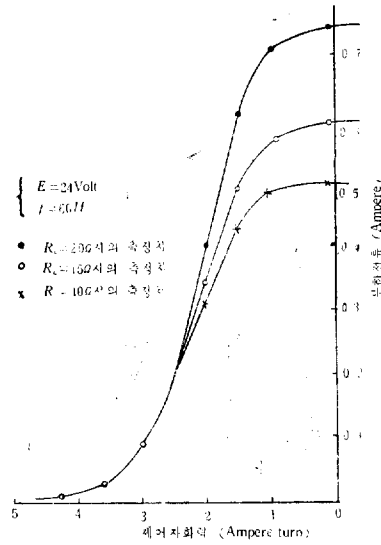


그림 23. 시험 B 자기피이드백형 자기증폭기의 제어특성.

Fig. 23 Load currents vs. control ampere-turns of test model B self-saturated magnetic amplifier.

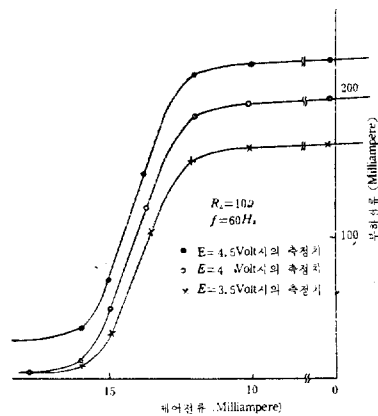


그림 24. 시험 A 자기피이드백형 자기증폭기의 전압특성.

Fig. 24 Load currents vs. control currents of test model A self-saturated magnetic amplifier.

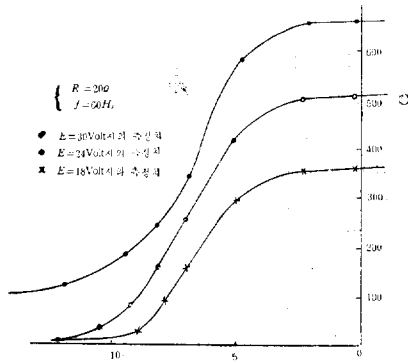


그림 25. 시형 B 자기피이드백형 자기증폭기의 전압특성.

Fig. 25 Load currents vs. control currents of test model B self-saturated magnetic amplifier.

9. 검토

본 연구에서는 주로 정상상태로 동작되고 있는 자기증폭기의 특성을 이론적으로 해석하였고 또한 실험적으로 확인하였을 뿐이며 과도현상이나 스냅(snap) 현상은 검토하지 못하였다. 그러나 시형 가포화리액터의 등암페어턴 특성은 그림 18과 그림 19에서 볼 수 있는 바와 같이 그 이론치와 실제 측정치가 거의 정확하게 일치하였고, 특히 자기피이드백형 자기증폭기를 제작하여 실험한 결과 그 암페어턴 증폭도가 $K_{AT}=250 \sim 400$ 이나 되었다는 점은 앞으로 국내에서도 자기증폭기의 응용분야가 크게 개척될 수 있음을 예기시켜 주었다. 즉 피이드백형 자기증폭기는 자동전압장치(automatic voltage regulator)나 무접점자기스위치(non-contacting magnetic switch)등에 이용될 수 있으며 그 증폭단을 여러개로 증가시킬 경우에는 열전대나 광전지 등과 같은 탐지장치의 미소한 출력을 입력으로 하여 1000 KW 정도의 대출력을 제어할 수 있을 것이다.

저자들이 본 연구과정중에 가장 문제점으로 느꼈던 점들은 첫째로, 적절한 환형철심재료를 국내시장에서 구하기가 어려웠기 때문에 여러종류의 시형에 대한 특성변화실험을 수행할 수 없었다는 점이고 둘째로, 규격에 맞는 환형권선을 구하지 못하였기 때문에 $0.6 \sim 0.8 \phi$ 정도의 굵은 권선은 기계로 감을 수 없었다는 점 그리고 셋째로, 설계경험이 없고 국내에서는 최초로 시제품을 만들었기 때문에 이론적인 설계치와 실제로 제작할 때의 설계여유를 충분히 계산하지 못해서 제작이 어려웠다는 점 등이다. 또한 자기증폭기의 부하전류가 제 3 고조파 및 제 5 고조파 성분을 포함하기 때문

에 통신용 전력제어기기로서는 사용하기 곤란하다는 점, 제작시에 완전한 조립공정이 이루어 지지 않을 경우 기계적 공진현상에 의한 소음이 발생된다는 점, 등은 앞으로 계속 연구되어야 할 것이다.

6. 결론

저자들은 본 연구과정을 통하여 아래와 같은 연구결과를 얻었다.

국내에서는 최초로 실험실에서 제작된 2KVA 급 가포화리액터와 0.4 VA 및 5 VA 급 자기피이드백형 자기증폭기의 특성실험을 통하여 등암페어턴의 법칙(law of equal ampere-turns)을 확인하였으며 피이드백작용에 의한 고증폭특성을 실험적으로 입증하였다.

즉, Z-10 규소강판을 철심으로 사용한 2KVA 급 가포화리액터의 경우 $\frac{N_c}{N_g}=15$ 일 때에 제어전류가 1 A 이면 출력전류는 15 A 가 되었다. 또한 자기 이력곡선이 구형에 가까운 50% 니켈강을 철심으로 이용할 경우 자기피이드백형 자기증폭기의 암페어턴 증폭도는 그림 22와 그림 23에서 볼 수 있는 바와 같이 $K_{AT}=250 \sim 400$ 으로 됨을 실험적으로 확인하였다. 특히 동일한 50% 니켈강이라도 자기특성이 보다 구형에 가까운 철심을 사용한 자기증폭기(시형 A)가 구형이 아닌 자기 이력특성을 갖는 철심을 사용한 자기증폭기(시형 B)의 경우보다 암페어턴 증폭도가 더 크다는 사실을 실험에 의하여 입증하였다.

자기증폭기의 제작시에는 기계적 공진현상을 방지하기 위하여 철심-철심간, 철심-권선간, 권선-권선간에 공격이 생기지 않도록 하여야 하며 가급적이면 철심을 몰딩(molding)하는 것이 양호함을 알 수 있었다.

본 연구결과 제작된 시형 가포화리액터와 자기증폭기는 정격부하전류의 범위내에서 전압조정기(voltage regulator) 및 소입력증폭기, 무접점 자기스위치(non-contacting magnetic switch)등에 이용될 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

부호 및 약자

- A_F 철심단면적, cm^2
- A_W 철심의 창면적, cm^2
- ΔAT_C 전폭제어자화력, oersted
- B, 포화자속밀도, kilogauss
- b 철심의 적층높이, $\frac{1}{2}(OD-ID)$, cm
- E 전원전압(실효치), volt
- E_C 제어전원전압, volt.
- E_0 임계포화전압(실효치), volt.
- e_G 출력권선의 단자전압(순간치), volt

f 전원전압의 주파수, Hz
 H 철심의 적층높이, cm
 I_C 제어전류(평균치), ampere
 I_A 여자전류, ampere.
 I_L 부하전류(평균치), ampere
 ID 내경(inner diameter), cm
 i 순간전류, ampere
 K_{AT} 암페어턴 증폭도
 K_C 코어게인(core gain), weber/AT
 K_I 전류증폭도
 l_F 철심의 평균차로, cm
 MA 자기증폭기(magnetic amplifier)의 약자
 N_C 제어권선수, 회(turn)
 N_F 피이드백권선수, 회
 N_G 출력권선수, 회
 $n = N_C / N_G$
 OD 외경(outer diameter), cm
 R_{CT} 제어회로의 총저항, ohm.
 R_d 철심의 동저항(dynamic resistance), ohm.
 R_L 부하저항, ohm
 SR 가포화리액터(saturable reactor)의 약자
 ϕ , 포화자속, weber.
 ω 각속도, radian/second

참 고 문 헌

(1) Burgess, C. F. and Frankenfield, B. : Regulation of electric circuit. U. S. Patent 720,884, issued Feb. 17 (1903)
 (2) Jonas, J. : Apparatus for regulating the voltage of metal vapor-rectifier installation. U. S. Patent 1,434,346, issued Oct. 31 (1922)
 (3) AIEE Committee Report: Magnetic amplifier bibliography. T.A.I.E.E., 77, Nov., 613—627 (1958)
 (4) AIEE Committee Report: Magnetic amplifier bibliography. T.A.I.E.E., 77, part I, 1051—1057 (1959)
 (5) Storm, H.F. : Magnetic Amplifiers. John Wiley & Sons, Inc., New York (1955)
 (6) Geyger, W. A. : Magnetic Amplifier Circuit. Mc GrawHill Book Co., Inc., New York (1957)
 (7) James, G. M. : Types of magnetic amplifiers—Survey. T.A.I.E.E., 71, 229—237 (July, 1952)
 (8) Samuel, D. : Magnetic amplifiers for servo systems. Electronic, 134—135, March 13 (1959)
 (9) 宮澤・穴山: 磁氣增幅器入門, 電氣書院, 東京(1969)
 (10) 茂木晃: 磁氣增幅器讀本, オーム社, 東京(1968)
 (11) Lafuze, D. L. : Magnetic Amplifier Analysis John Wiley & Sons, Inc., New York(1962)
 (12) Hubbard, R.M., and Bishop, M.M. : A comprehensive study of magnetic amplifier design. T.A.I. E.E., 77, part I, 562—583 (1958)
 (13) Bedford, B.D., Willis, C.H., and Dodson, G.C. : An analysis of optimum core configuration for magnetic amplifiers using a simplified approach, T.A.I.E.E., 74, part I, 62—70 (1955)
 (14) AIEE Committee Report: Proposed standards for core test method for toroidal magnetic amplifier cores, T.A.I.E.E., 77, part I, 524—531 (1958)
 (15) Anderson, R.E. : Magnetic-amplifier design, T. A.I.E.E., 77, part I, 160—175 (1958)
 (16) AIEE Committee Report: Proposed standards test codes for magnetic amplifiers. T.A.I.E.E., 78, part I, 453—456 (1959)
 (17) 日本工業規格: 磁氣增幅器 通則(JIS, C4701—1967)