

結合係數 K에 의한 漏洩變壓器의 等價回路

Equivalent Circuit of Leakage Transformer using coupling Coefficient K

李洸植* · 孔徽植** · 金周弘***

(Kwang-Jeek Lee · Whee-Shick Gong · Jhu-Hong Kim)

요 약

본 論文에서는 漏洩變壓器의 特性을 지배하는 要素인 結合係數K를 누설자속으로부터 도출하여 이 결합계수K가 電流의 함수임을 제시하고 결합계수K를 媒介變數로 하는 누설변압기의 等價回路를 提案하였다. 제안한 등가회로는 K에 비례하는 테브난 정전압전원과 $1-K^2$ 에 비례하는 인덕터를 갖는 회로로 表現하였다. 본 등가회로는 결합계수K의 범위가 $0 \leq K \leq 1$ 인 영역. 즉, 이상변압기, 누설변압기, 인덕터의 動作特性을 잘 반영하고 있으므로 漏洩變壓器의 設計에 有用될 수 있음을 證明하였다.

Abstract

The coupling coefficient K controls the characteristic behaviors of leakage transformer. The value of coupling coefficient K was obtained from the leakage flux of leakage transformer and ascertained from the variation due to the function of current.

Therefore, this paper presented the equivalent circuit of leakage transformer consisting of Thevenin's constant voltage source and inductor as $(1-K^2)L_2$ which were proportional to parameter K.

The proposed equivalent circuit verified the validity in designing the leakage transformer because it was in good agreements of the behaviors of ideal transformer(K is 1), leakage transformer(K is $0 \leq K \leq 1$), inductor(K is 0).

*正會員 : 서울산업대학 매체공학과 조교수

**正會員 : 동우전문대학 전자계산과

***正會員 : 동국대학교 전자공학과 교수

接受日字 : 1992年 3月 31日

1. 序 論

漏洩變壓器는 일반변압기에 比하여 磁束의 누설이 크며, 負荷의 變動에 따른 부하전류의 변화를 억제하는 定電流 特性을 가진 변압기로써 네온燈, 아크鎔接器 방전등의 電源에 사용되고 있다. 이것은 누설이 적은 일반변압기에 인덕터를 직렬로 結合한 전원 特性을 갖고 있으며 그 설계나 해석은 복잡하다.^{1), 2)} 그러므로 이러한 누설변압기의 特性을 잘 나타내고 同變壓器의 설계를 위한 一貫性있는 설계식을 誘導하기 위하여 본 논문에서는 누설변압기의 特性을 支配하는 요소인 結合係數 K의 數式표시와 이것을 媒介變數로 하는 누설변압기의 等價回路를 提案하였다.

2. 漏洩變壓器의 特性과 結合係數

漏洩變壓器는 漏洩磁束을 갖고있는 변압기로서 그 作用은 누설이 없는 理想變壓기와 漏洩磁束으로 인한 인덕터를 包含한 結合계로써, 그림 2.1 및 2.2와 같은 等價回路로 표시 할 수 있다.

그림 2.1은 누설변압기의 일종으로 a, b점을 기준하여 左右와 중앙의 磁路를 제1, 제2, 제3의 磁路로 구분하고 그 reluctance(자기저항)와 permeance를 각각 R₁, R₂, R₃, 및 P₁, P₂, P₃라고 表示하면

$$R_j = \frac{1}{P_j} = \frac{\ell_j}{\mu_j A_j} \tag{2.1}$$

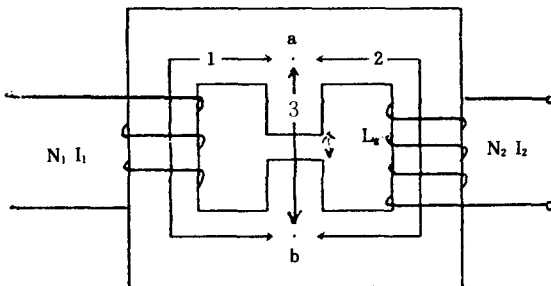


그림 2.1. EI형 漏洩變壓器
Fig. 2.1. EI type leakage transformer.

이 된다. 여기서 j번째 자로의 길이, 面積 및 透磁率은 ℓ_j , A_j 및 μ_j 이고, ℓ_g 는 공극의 길이이다. 그림 2.1에서 一次側의 起磁力 $N_1 I_1$ 에 의해 발생된 자속 ϕ_{11} 은 제 2磁路와 제 3磁路로 分배되고, 이 자속을 각각 ϕ_{12} , ϕ_{13} 라하면

$$\phi_{11} = \phi_{12} + \phi_{13} \tag{2.2}$$

이고, 二次側의 기자력, $M_2 I_2$ 에 의해 발생하는 자속 ϕ_{22} 도 이와같이

$$\phi_{22} = \phi_{21} + \phi_{23} \tag{2.3}$$

으로 표시 할 수 있으므로 結合係數 K는 그 定義에 의해서 다음과같이 표시 된다.

1) 一次側의 기자력 또는 二次側의 기자력만 있는 경우

$$K = \frac{\phi_{12}}{\phi_{11}} \quad I_2 = 0 = \frac{\phi_{11} - \phi_{13}}{\phi_{11}} = 1 - \frac{\phi_{13}}{\phi_{11}}$$

$$K = \frac{\phi_{21}}{\phi_{22}} \quad I_1 = 0 = \frac{\phi_{22} - \phi_{23}}{\phi_{22}} = 1 - \frac{\phi_{23}}{\phi_{22}} \tag{2.4}$$

2) 一次側과 二次側에 기자력이 동시에 있는 경우 ($I_1 \neq 0$, $I_2 \neq 0$) 이때 漏洩磁路인 제 3磁路의 자속 ϕ_3 는

$$\phi_3 = \phi_{13} + \phi_{23} \tag{2.5}$$

이고, 위식과 式 (2.4)에서

$$\phi_3 = (1 - K) (\phi_{11} + \phi_{22}) \tag{2.6}$$

이 성립하므로 結合係數 K에 대하여 정리하면

$$K = 1 - \frac{\phi_{13} + \phi_{23}}{\phi_{11} + \phi_{22}} \tag{2.7}$$

로 주어져 一次 및 二次側의 기자력에 의한 結合係數의 一般式이 얻어진다.

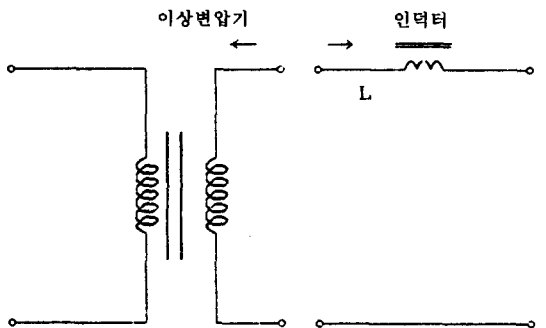


그림 2.2. 漏洩變壓器의 變壓器의 等價作用
Fig. 2.2. Equivalent circuit of leakage transformer.

2.1 結合係數 K와 回路電流

式 (2.7)은 결합계수 K를 자속으로 표시 하였으나 이를 자기저항으로 나타내기 위하여 等價回路를 그림 2.3과 같이 표시하였다.

그림 2.3에서 발생한 자속 ϕ_{11} 과 자속 ϕ_{22} 는 자속 分配率에 의하여 분배 되므로 제3자로인 R_3 에 유입되는 자속 ϕ_{13} 와 ϕ_{23} 는

$$\phi_{13} = \frac{R_2 \phi_{11}}{R_2 + R_3} \quad (2.8)$$

$$\phi_{23} = \frac{R_1 \phi_{22}}{R_1 + R_3} \quad (2.9)$$

가 된다. 따라서 결합계수 K는 式 (2.7)에 위 식의 ϕ_{13} 와 ϕ_{23} 를 대입하면

$$K = 1 - \frac{R_2 \phi_{11} + R_1 \phi_{22}}{\phi_{11} + \phi_{22}} \quad (2.10)$$

이 된다. 여기서 解析을 간결하게 하기 위하여 그림 2.1과 같이 제3자로에 대하여 대칭형인 경우를 취급하였다. 이때는 $R_1 = R_2$ 이며, 이를 다시 R' 으로 놓고, $l_1 = l_2$ 를 l' 으로, 단면적 $A_1 = A_2$ 를 A' 으로 놓으면 (2.10)式은

$$K = 1 - \frac{R'}{R' + R_3} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\mu A' l_3}{\mu_3 A_3 l'}} \quad (2.11)$$

이다. 위 식은 결합계수 K가 지로의 단면적과 길이로 표시되는 물리적인 형태와 그리고 자성체의 투자율 μ , 누설자로인 제3자로의 μ_3 로 구성된 함수임을 알 수 있다. 여기서 $K' = A' l_3 / A_3 l'$ 로 놓으면 式(2.11)은

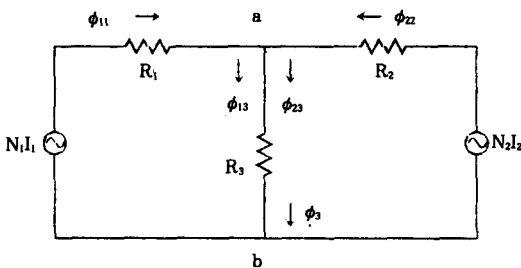


그림 2.3. 漏洩變壓器의 磁氣回路

Fig. 2.3. Reluctance circuit of leakage transformer.

$$K = 1 - \frac{1}{1 + K' \frac{\mu_r}{\mu_{3r}}} \quad (2.12)$$

단, $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_3 = \mu_0 \mu_{3r}$

와 같이 비투자율 μ_r 및 μ_{3r} 과 K' 의 함수로 表示된다.

그림 2.4는 RG8H(0.35mm) 자성체의 실측 자화곡선과 투자율 곡선을 a와 a'로 표시하였다. 이 자성체에 공극을 첨가하면 그 자화곡선은 공극이 없는 자성체 보다는 자계의 增加에 따라 자속 밀도가 완만하게 증가한다. 따라서 곡선 b는 동일 자성체에 공극을 포함하고 있는

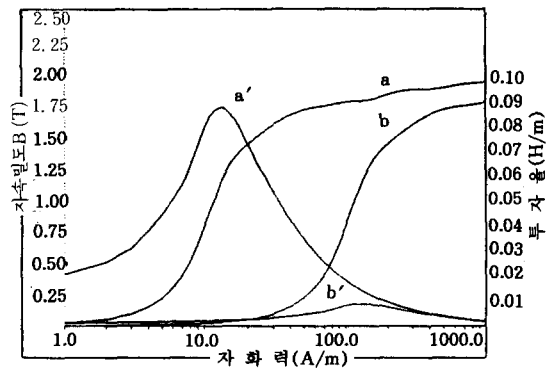


그림 2.4. 자성체(RG8H)와 공극을 갖는 자로의 자화곡선과 그 투자율곡선

Fig. 2.4. B-H Curve and permeability curve for magnetic material and its air-gapped magnetic branch.

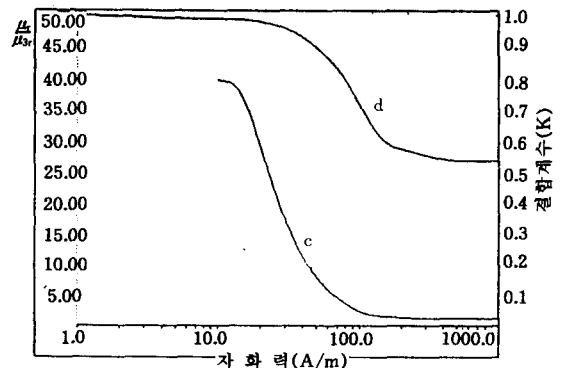


그림 2.5. μ_r/μ_{3r} 과 결합계수 K곡선(단, $K' = 1$)

Fig. 2.5. μ_r/μ_{3r} Curve and coupling coefficient K curve.

자화곡선으로 곡선 a에 비해 자계의 크기가 10배되는 지점에서 동일자속밀도를 갖도록 나타내었으며 그 투자율(공극이있는 경우)을 b'로 표시하였다. 여기서 곡선의 수치는 부록 표 1에 표시하였다.

그림 2.4에서 자화력 變化에 따른 투자율 곡선 a'와 b'의 비율을 μ_r/μ_{3r} 로 나타낼 수 있으므로 그림 2.5에 그 비곡선을 c로 표시하였으며, 식 (2.12)에서 K'가 1이라면 결합계수 K의 값은 μ_r/μ_{3r} 의 크기에 따라 변화하므로 그림 2.5에 곡선 d로 결합계수 K를 표시하였다. 그림 2.5에서와 같이 μ_r/μ_{3r} 는 磁化力의 크기에

따라 변하고 그 자화력은 전류 I의 함수이므로

$$\mu_r/\mu_{3r} = f(I) \quad (2.13)$$

이 되고 이 비투자율 수치에 따라 변화하는 결합계수 K는

$$K = \Psi(\mu_r/\mu_{3r}) = f(I) \quad (2.14)$$

와 같이 전류의 함수로써 표시 할 수 있다. 따라서 공극을 갖고 있는 누설변압기는 부하전류가 增加하면 결합계수 K가 감소하는 특성을 갖고있다. 즉 결합계수 K는 전류 I의 함수임을 시뮬레이션에 의해 알 수 있으며, 누설변압기의 동작특성에 寄與하게 된다.

表 1. 자성체(RG8H)의 실제 값과 공극을 갖는 그 자료의 데이터

Table 1. The real value of RG8H magnetics material and the data of its air-gapped magnetics blanch.

1*				2**		3***	
H(A/m)	B(T)	μ (H/m)	μ_r	μ_3 (H/m)	μ_{3r}	$\mu/\mu_3 = \mu_r/\mu_{3r}$	K
1	0.02	0.02	1600				
1.3	0.03	0.023	1846				
2	0.05	0.025	2000				
4	0.15	0.0375	3000				
6	0.30	0.0500	4000				
8	0.50	0.0625	5000				
10	0.78	0.0780	6240	0.002	160	39	0.975
13	1.12	0.084	6720	0.0022	184	38.18	0.9744
20	1.43	0.0715	5720	0.0025	200	28.6	0.9665
40	1.66	0.0415	3320	0.00375	300	11.06	0.9171
60	1.72	0.0286	2293	0.005	400	5.732	0.8515
80	1.74	0.0217	1740	0.0062	500	3.56	0.7783
100	1.76	0.0176	1408	0.0078	624	2.25	0.7024
130	1.77	0.0136	1088	0.0084	672	1.62	0.6184
200	1.82	0.0091	728	0.00715	572	1.27	0.5595
400	1.86	0.0046	372	0.00514	332	1.12	0.5284
600	1.89	0.0031	252	0.002866	229	1.10	0.5238
800	1.91	0.0024	192	0.002175	174	1.10	0.5238
1000	1.92	0.0019	160	0.00176	140	1.09	0.5216
4000	1.98	0.0005	39			1.06	
10000	1.99	0.0001	8	0.0002	16	0.50	0.334

* 1 : 일본 히다치 캐탈로그에 의한 자성체 RG8H(0.35mm)의 실제 값

** 2 : 동일 자성체에 공극을 첨가 한 자료로 일정 자속밀도 B에 대해 10배의 자화력에 1/10배의 μ_{3r} 값을 取한 데이터

*** 3 : 본 논문 식(2.12)에 의한 결합계수 K 값.

여기서 곡선 c와 d의 數値는 표 1에 표시 하였다.

2.2 공극이 있는 漏洩磁路의 비투자율 計算

그림 2.1에서 제3자로의 자기저항 R_3 는 공극 부분의 자기저항 R_g 와 자성체의 자기저항 R_3' 로 이루어 졌으므로

$$R_3 = R_3' + R_g \quad (2.14)$$

가 되고, 다시

$$\phi_3 \frac{l_3}{\mu_0 \mu_{r3} A_3} = \phi_3 \left(\frac{l_3 - l_g}{\mu_0 \mu_r A_3} \right) + \frac{l_g}{\mu_0 A_3} \quad (2.15)$$

가 된다. 실제로 공극의 길이 l_g 는 $l_g \ll l_3$ 의 관계가 成立하므로 近似的으로 위식을 제3자로의 비투자율 μ_{3r} 에 관하여 定理하면

$$\mu_{3r} = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_g}{l_3} \mu_r} \quad (2.16)$$

으로 표시된다.

3. 結合係數 K로 표시된 누설변압기의 等價回路

3.1 漏洩變壓器의 테프난형 等價回路와 結合係數

종래 변압기의 등가회로는 인덕턴스 L과 상호인덕턴스 M 및 저항 R 그리고 권선비 n으

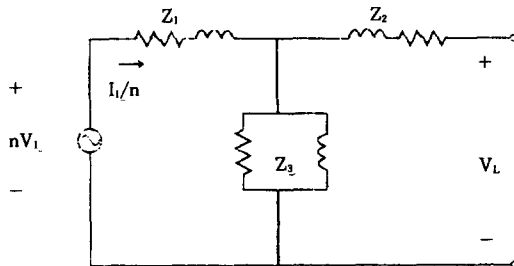
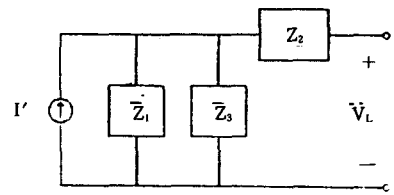


그림 3.1. 二次回路로 變換과 變壓器의 T형 等價回路

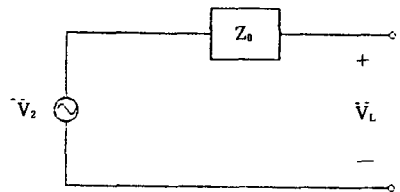
Fig. 3.1. T Type Equivalent Circuit of T-transformer referred to its secondary side

로 표시된 T형 이나, 여기서는 누설변압기의 특성을 잘 나타 낼 수 있는 등가회로를, 결합 계수 K와 인덕턴스 L 및 저항 R을 포함 한 테브난 전압원으로 대치하여 누설변압기 설계 법에 이용 되도록 그림 3.3과 같이 제안 하였다.

그림 3.1은 변압기의 T형 等價回路에다 理想變壓器의 捲線比를 취급하고, 회로에서 一次側의 임피던스를 이상변압기의 二次단자에 환산한 것이다. 따라서 우측페로의 전류는 I_1/n 이고, 一次側의 전압은 nV_1 으로 주어지며, 이때



(a)



(b)

그림 3.2. 테브난 전원으로 표시한 등가회로
Fig. 3.2. Equivalent circuit with Thevenin's constant voltage source.

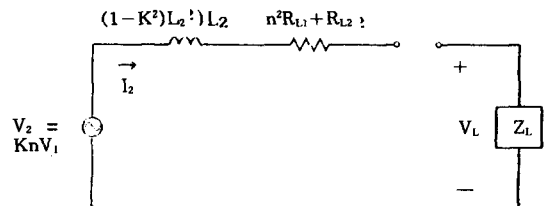


그림 3.3. 테브난 전압원과 결합계수 K로 표시된 누설변압기 등가회로

Fig. 3.3. Equivalent circuit with Thevenin's constant voltage source and coupling coefficient K.

捲線比는 $n = (N_2/N_1)$ 하였다.

그림 3.1에서 각 지로의 임피던스 Z_1, Z_2, Z_3 코일의 저항과 코어의 손실분을 包含하고 있으므로 식 (3.1)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= n^2 R_{L1} + j\omega(n^2 L_1 - nM) \\ Z_2 &= R_{L2} + j\omega(L_2 - nM) \\ Z_3 &= R_c \approx nM = \frac{j\omega nM R_c}{R_c + j\omega nM} \end{aligned} \quad (3.1)$$

단, R_{L1}, R_{L2}, R_c : 일차 및 이차 코일의 저항과 코어의 손실 저항

L_1, L_2 : 일차 및 이차측의 인덕턴스

V_1, V_L : 일차측 전압원과 부하전압

그림 3.1의 회로를 테브난의 정전압원으로 표시하면 그림 3.2의 b도와 같이되고 변환과정에서 노턴의 정전류원 I' 와 테브난의 정전압원 V_2 그리고 등가임피던스 Z_0 는

$$I' = \frac{n V_1}{Z_1} \quad (3.2)$$

$$V_2 = \frac{n V_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad (3.3)$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} + Z_2 \quad (3.4)$$

로 되어 각각 코일의 저항과 코어의 손실을 포함한 일반식으로 주어진다. 여기서 코어의 손실분을 무시 하여 $R_c = \infty$ 로 하고, $j\omega L_2 \gg n^2 R_{L1} + R_{L2}$ 와 이상변압기의 권선비 $n^2 = L_2/L_1$ 및 상호인덕턴스 $M = K\sqrt{L_1 L_2}$ 를 이용하여 식(3.2)~식(3.4)식을 정리하면 식(3.5)~식(3.7)과 같이 된다.

$$I' = \frac{n V_1}{j\omega L_2 (1-K)} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= n V_1 \frac{j\omega n M}{j\omega L_2 + n^2 R_{L1}} \\ &= Kn V_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{\{j\omega^2(L_2^2 - n^2 M^2) + (n^2 R_{L1} + R_{L2})\} + j\omega L_2 (n^2 R_{L1} + R_{L2})}{j\omega L_2 + n^2 R_{L1}} \\ &= j\omega(1-K^2)L^2 + (n^2 R_{L1} + R_{L2}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

그림 3.3는 식(3.6)과 식(3.7)에 의한 등가회로를 나타냈으며, 정격부하시의 회로의 전류는 (3.8)식과 같다.

$$I_s = \frac{Kn V_1}{j\omega(1-K^2)L^2 + (n^2 R_{L1} + R_{L2}) + Z_L} \quad (3.8)$$

3.2 提案한 누설변압기 等價回路的 檢討

그림 3.3의 등가회로는 테브난의 전압원 $V_2 = KnV_1$ 과 임피던스 $Z_0 = j\omega(1-K^2)L^2 + (n^2 R_{L1} + R_{L2})$ 로 표시 되므로 결합계수 K가 1일때 저항 $n^2 R_{L1} + R_{L2}$ 를 零으로 보면 이 등가회로의 내부 임피던스는 0이고, 정전압원 V_2 는

$$V_2 = n V_1 \quad (3.9)$$

로 주어져 이상변압기의 특성을 만족시킨다. 그러나 실제로 누설이 있을 경우에는 등가회로의 임피던스 Z_0 가 零이 되지않고 정전압원 V_2 와 같이 결합계수 K에 의하여 변화하는 값을 취하게 된다. 따라서 결합계수 K의 변화에 의한 등가회로의 특성은 다음과 같다.

1) $K=1$ 일때는, $V_2 = nV_1$ 이고 이상변압기의 특성을 갖는다.

2) $0 < K < 1$ 이라면, 그림 3.3의 $(1-K^2)L^2$ 는 누설 인덕터로 작용하며 부하 임피던스 Z_L 이 단락시 등가회로에 흐르는 전류 I_s 는

$$I_s = \frac{Kn V_1}{j\omega(1-K^2)L^2 + (n^2 R_{L1} + R_{L2})}$$

로 표시 된다. 이때 식(2.13) 및 그림 2.5의 결합계수 곡선 d와 같이 공극을 갖고 있는 누설 변압기의 결합계수 K는 부하 전류가 증가 할 경우에는 감소하게 되므로, 위 식에서 결합계수 K가 감소 할 수록 분모의 $(1-K^2)$ 은 분자에 포함된 K보다 크게 작용하여 회로에 흐르는 전류의 흐름을 억제하게 된다.

3) $K=0$ 이라면 변압기로서 동작하지 않는다.

이와같이 그림 3.3의 등가회로는 이상변압기의 특성을 만족 시키고, 누설변압기의 동작특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

결합계수 K를 매개변수로 한 테브난 등가회로를 누설변압기의 등가회로 提案하고 누설변압기의 特性解析에 적용한 결과는 다음과 같다.

1) 누설변압기는 결합계수 K에 비례하여, KnV_1 의 정전압 전원에 $(1-K^2)L^2$ 의 인덕터를

직렬로 연결한 등가회로로 표시된다. 이것은 누설변압기의 전기적 특성을 잘 나타내고 있다.

2) 공극을 갖고 있는 누설변압기의 결합계수 K 를 수식으로 導出하여 부하전류의 함수로 주어짐을 알 수 있었고 이 동작 특성은 누설변압기의 전류변동을 抑制하는 정전류 특성해석에 잘 적용되었다.

3) 본 등가회로는 $K=1$ 인 이상 변압기, $K=0$ 인 인덕터 동작 그리고 $0 < K < 1$ 인 누설변압기 등의 모든 변압기에 대해 一貫的으로 해석이 가능하였다.

따라서 이 등가회로는 누설변압기 설계시 有用하게 적용될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Katsuhisa Tahira, Takahiko Ohtani, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka "Analysis of Variable Leakage Transformer under Free and Forced Magnetizing Conditions" The Science & Engineering of Doshisa University, Vol.23, No.1, pp.72-85, April 1982.
- 2) Mitsuru Kanamori, Yoshiro Kagami, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka "Analysis of Magnetic Field in a Leakage Transformer Type Ballast" The Science & Engineering of Doshisa University, Vol.25, No.2, pp.1-11, August 1984.
- 3) Kazushi Kodama, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka, Mitsuru Kanamori, Yoshiro Kagami, "Analysis of Characteristics in Leakage Transformer Type Ballast by using Equivalent Circuits" J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol.69, No.2, pp.53-58, 1985.
- 4) Takayoshi Nakata Yoshihiro Kawase, Hiroaki Funakoshi, "Analysis of Characteristics of a Leakage Transformer by using the Finite Element Method" J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol.68, No.10, pp.509-512, 1984.
- 5) Tadashi Fukao, Hiromitsu Hirama, "Variable Leakage Transformer and Analysis of Characteristics" Electrical Engineering in Japan, Vol. 103, No.2, pp. 106-114, 1983.
- 6) S.J.Chapman, Electric machinery fundamentals, McGraw-Hill, pp.62-65.1985.