

변압기 잔류자속 측정에 관한 연구

김영학
부경대학교 전기공학부 교수

A study on the Measurement of Residual Flux for Transformer

Young-Hak Kim
Professor, Division of Electrical engineering, Pukyong University

요약 누설자속으로 변압기의 잔류자속을 구하는 기존의 연구에서는 전달함수를 이용하였다. 전달함수는 변압기의 \pm 의 두 잔류 점을 지나는 순간에 측정된 잔류자속과 동일한 순간에 변압기 밖에서 구한 누설자속으로 구하였다. 본 연구에서는 전달함수를 구하지 않고 동작 최대의 누설자속과 잔류자속에 의한 누설자속의 비를 계산하여 잔류자속을 구하는 방법이 가능함을 확인하였다. 이 방법의 장점은 전류잡음으로 인한 전달함수의 불확정성을 피하는 것이다. 그리고 센서의 잡음을 측정하여 잡음의 드리프트가 측정결과에 미치는 영향을 조사하였다. 잔류 누설 자속밀도를 센서의 드리프트인 80nT와 비교하면 거리 10mm에서는 약 66배, 100mm에서는 5배 이상이었다. 측정거리 100mm는 본 연구에서 얻어진 잔류자속을 구하기 위한 최대 측정 거리였다.

주제어 : 변압기, 잔류자속, 누설자속, 자계센서, ϕ -I곡선, 전달함수

Abstract In previous studies to obtain the residual magnetic flux of the transformer using the leakage magnetic flux, a transfer function was used. The transfer function was consisted with the leakage magnetic flux measured outside the transformer and the residual magnetic flux measured at the moment passing through the two \pm residual points. In this study, a method of calculating the ratio of the maximum operating leakage flux to the residual leakage flux was proposed. The advantage of this method is to avoid the uncertainty of the transfer function due to current noise. Then, the noise of the sensor was measured to investigate the effect of the drift of the noise on the measurement results. Comparing the residual leakage magnetic flux density with 80nT of the drift noise, 66 times or more at a distance of 10 mm and 5 times or more at a distance of 100 mm were obtained. 100mm was the maximum measurement distance to obtain the residual magnetic flux.

Key Words : Transformer, Residual magnetic flux, Leakage magnetic flux, Magnetic sensor, ϕ -I curve, Transfer function

1. 서론

변압기에 전류가 재충전될 때 잔류자속에 의해 기기의 파손을 유발할 수 있는 과도한 돌입전류[1-4]가 발생한다. 이를 방지하기 위해 변압기에서 발생하는 누설 자속으로부터 잔류자속을 구하는 방법[5]이 제안되었

다. 이 방법은 변압기에 전류를 흘려 전류가 0이 되는 순간에서 변압기 내부의 잔류자속과 동일한 시간에 외부에서 측정된 자속밀도로 전달함수를 구하는 것이 핵심이다. 그러나 전류잡음으로 인해 0이 되는 것을 결정하기 어려워 전달함수의 불확정성을 가졌고 이로 인해

*This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2021)

Corresponding Author : Young-Hak Kim(kimyh@pknu.ac.kr)

Received April 11, 2022

Accepted May 20, 2022

Revised May 6, 2022

Published May 28, 2022

잔류자속이 선행된 연구 결과[6,7]보다 부정확하였다. 그러나 측정 센서의 위치를 변압기에 근접시켰을 때 부정확성이 개선되었다. 본 연구는 전달함수를 이용하지 않고 잔류자속을 구하기 위해 두 가지를 실험하였다. 누설자속은 변압기의 동작에 의한 것이므로 변압기의 온과 오프 상태에서 바로 누설자속을 측정하는 것이 가능하다. 이 두 누설자속의 비를 구하여 이것을 변압기의 동작 자속에 곱하면 잔류자속을 구할 수 있다. 따라서 전달함수 없이 잔류자속을 구할 수 있다. 첫 번째 실험은 이것을 실험적으로 증명하는 것이다. 두 번째 실험은 자계 잡음을 측정하였다. 변압기와 측정지점 사이의 거리를 점차 길게 하면 누설자속은 급격히 감소한다. 여기에 자계 잡음이 부가되면 잔류자속에 자계센서 [8-10]의 드리프트의 값이 포함되어 정확한 잔류자속을 구하기 어렵고 본 연구의 방법은 적용할 수 없다. 따라서 자계잡음의 영향 없이 잔류자속을 구할 수 있는 최대 측정 거리를 구하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 이 연구에서 잔류자속을 구하는 방법을 설명하기 위한 것이다. Fig. 1(a)는 변압기에 인가되는 전류 파형이며 Fig. 1(b)는 전류 I와 변압기의 동작 자속 ϕ 와의 관계를 나타내는 ϕ -I곡선, 그리고 Fig. 1(c)는 변압기 밖에서 자계센서가 측정하는 파형을 나타낸 것이다. 이 파형은 연구 방법의 타당성을 보기 위한 것으로 일반 변압기에 인가되는 정현파 파형과 다르다. Fig. 1(a)에서와 같이 주기는 10초로 하였으며 t_{on} 과 t_d 를 각각 1초, 2초로 하였다. 최대 인가전류 I_m 을 고정하고 바이어스를 이용하여 변압기의 잔류점을 연속적으로 변화시켰다. Fig. 1(b)는 ϕ -I곡선을 나타낸 것이다. 곡선은 전류 축에서 바이어스만큼 이동하며 최대 동작자속 $\Delta\phi_m$ 은 최대 인가전류 I_m 에 의해 결정되면 잔류자속 ϕ_r 은 바이어스 전류에서 결정이 된다. Fig. 1(c)는 센서에서 측정하는 파형이다. ΔB_m 은 $\Delta\phi_m$ 에 의한 것이고 ΔB_r 은 각 잔류자속의 차이($\Delta\phi_{r+1}-\Delta\phi_r$)에 의한 것이다. 각 단계에서 5주기의 파형을 인가하며 전체의 측정시간을 340초로 하였다. 잔류자속은 식 (1)로 구한다.

$$\Delta\phi_r = \frac{\Delta B_r}{\Delta B_m} \times \Delta\phi_m \quad (1)$$

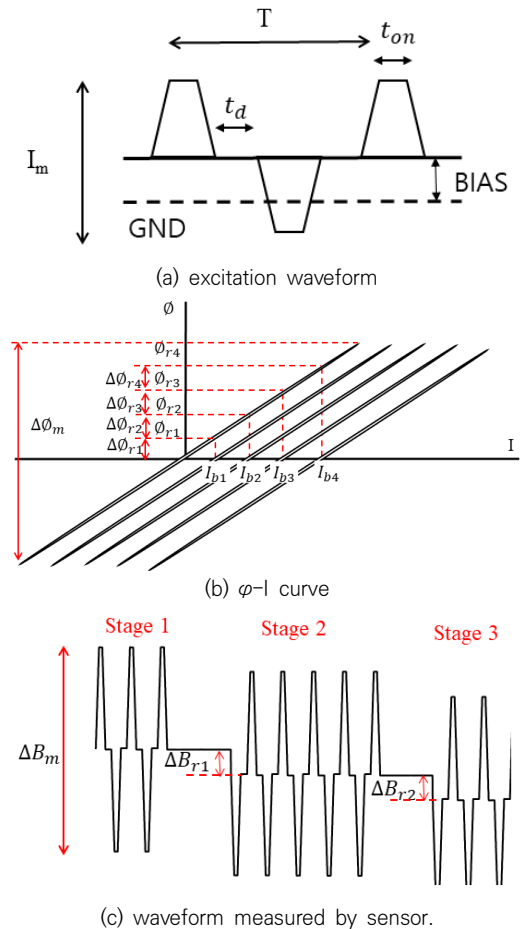


Fig. 1. Waveform excited to transformer, ϕ -I curve and waveform measured by sensor(these figures are needed to explain how to obtain residual flux).

$\Delta\phi_m$ 은 변압기의 2차 측 유도전압으로부터 구한다. 기존의 연구에서 전달함수를 이용하여 $\Delta\phi_r$ 을 구하지만, 이 연구에서는 ΔB_m 과 ΔB_r 을 측정해서 구하는 것이 차이점이다. 따라서 식 (1)의 적용 여부는 ΔB_m 과 ΔB_r 을 정확히 측정하는 것에 달려있다. Fig. 2는 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다. 램프로 구현된 파형을 data acquisition 보드와 증폭기를 통하여 변압기에 인가하였으며 누설자속은 자계센서로 측정하였다. 자계센서는 1nT의 분해능을 가지며 $\pm 100,000$ nT의 측정 범위를 가지는 3축 플럭스게이트 센서이다. Fig. 3은 변압기와 자계센서를 나타낸 것이다. 변압기는 E자형 NiZn 페라이트를 이용하여 제작하였고 자계센서는 누

설자속이 가장 큰 y방향 성분을 측정하였다. 측정 거리를 변압기 측면에서 10mm~400mm로 변화시켜 최대 측정 거리를 센서의 드리프트 잡음과 잔류자속이 비를 이용하여 구하였다. 그리고 거리에 따른 측정치를 2차원 정자장 FEM 해석으로 구한 계산치와 비교하였다.

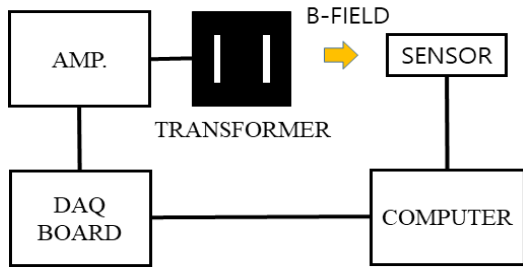


Fig. 2. Experimental configuration.

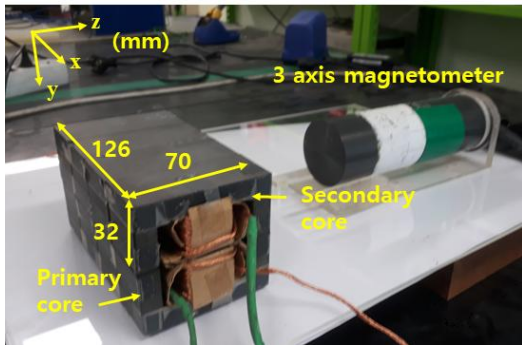


Fig. 3. Ni-Zn ferrite transformer and magnetic sensor

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 FEM 해석 결과를 나타낸 것이다. 변압기의 전류를 변화시켜 해석하였을 때, P1, P2 점에서의 자속 밀도는 거리에 따라 다르다. 하지만 전류변화에 따른 자속밀도의 비는 같으며 변압기에서의 자속밀도의 비와 일치하였다. 이로부터 변압기의 자화 상태의 변화는 어떤 거리에서도 누설자속을 측정하여 구할 수 있다. Fig. 5는 센서의 잡음을 측정하는 것이다. Fig. 5(a)와 같이 10초 동안의 시간에서는 잡음레벨이 거의 2nT로 $\pm 4nT$ 의 범위의 신호를 식별하기 어렵다. Fig. 5(b)는 측정을 400초로 하였을 때 측정하는 것이다. 측정시간이 길어지면 드리프트가 발생하며 크기는 거의 80nT의 크기를 가졌다. 이 결과로부터 측정시간이 길어지면 드리프트의 영향을 고려해야 함을 알 수 있다. 누설자속

측정에 이용되는 대부분의 플럭스게이트 자계센서의 사양서 상에는 잡음레벨은 있지만 드리프트 특성에 대한 언급은 거의 없어 이런 연구에서는 직접 측정하여 파악해야 한다.

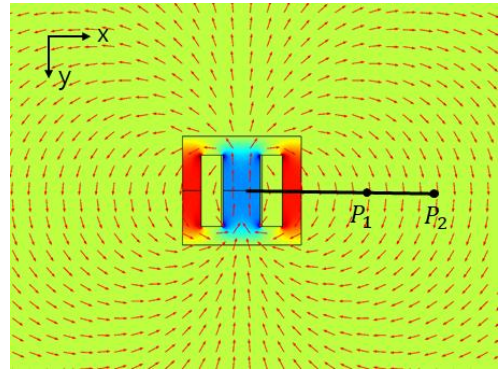
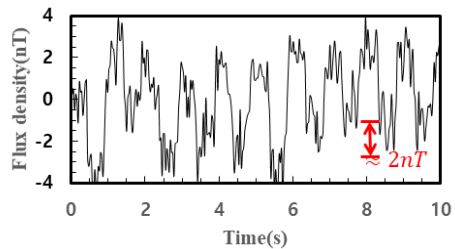
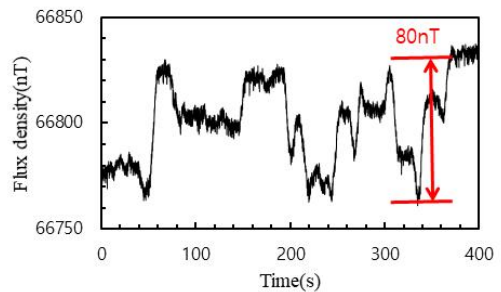


Fig. 4. FEM calculation result for transformer.



(a) magnetic noise measured during 10s



(b) magnetic noise measured during 400s

Fig. 5. Magnetic noise of magnetic sensor used for this experiment.

Fig. 6은 센서가 변압기 측면으로부터 10mm, 50mm, 70mm, 100mm의 거리에 있을 때, 변압기에서 발생하는 누설 자속밀도를 측정하는 것이다. Fig. 6(d)의 붉은 원의 부분만 제외하면 변압기에 인가된 파형과 측정된 파형이 일치하며 누설 자속밀도인 ΔB_m 과 ΔB_r 도 일정하게 변화하고 있다.

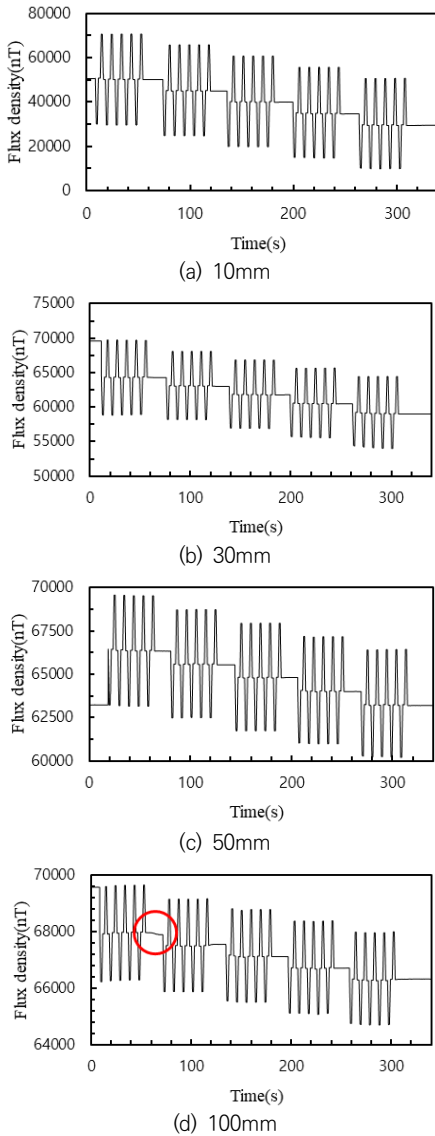


Fig. 6. Leakage flux densities measured at different distance from transformer.

Table 1은 Fig. 6으로부터 각 stage에서 평균한 ΔB_m 을 이동거리 별로 나타낸 것이고 Table 2는 ΔB_r 을 나타낸 것이다. ΔB_r 을 Fig. 5(b)에서 구한 드리프트의 크기 80nT와 비교하면 거리 100mm에서 stage1-2의 ΔB_r 과는 약 4배, 나머지는 5배~6배 이상 크다. Table 3은 ΔB_m 과 ΔB_r 의 비를 나타낸 것이다. 이것은 식(1)의 잔류자속을 계산할 때 이용된다. 드리프트의 영향이 있었던 Fig. 6(d)의 stage 1-2에서는 0.103인 것을 제외 하면 모든 거리에서 0.132~0.138의 값을 나타내었다.

Table 1. ΔB_m obtained from Fig. 6

	distance(mm)					
	10	20	30	50	70	100
stage2	40223	23968	20160	10793	6197	3258
stage3	39619	24263	18641	9873	6079	3210
stage4	40248	25812	19187	9775	6079	3268
stage5	40667	26594	19433	10069	5977	3199

Table 2. ΔB_r obtained from Fig. 6

	distance(mm)					
	10	20	30	50	70	100
stage1-2	5311	3141	2671	1412	854	335
stage2-3	5229	3171	2454	1313	804	427
stage3-4	5287	3486	2520	1292	824	434
stage4-5	5346	3511	2597	1341	813	430

Table 3. The ratio of ΔB_r and ΔB_m .

	distance(mm)					
	10	20	30	50	70	100
stage1-2	0.132	0.131	0.132	0.131	0.138	0.103
stage2-3	0.132	0.131	0.132	0.133	0.134	0.133
stage3-4	0.131	0.135	0.131	0.132	0.136	0.133
stage4-5	0.131	0.132	0.134	0.133	0.136	0.134

Fig. 7은 변압기로부터 10mm의 지점에서 ϕ -I곡선을 측정된 것이다. 인가전류의 최대치 I_m 을 고정하였기 때문에 $\Delta \phi_m$ 은 모두 같으며 bias만큼 일정한 간격으로 곡선이 이동하였다. 기존의 연구와 같이 전류 파형의 잡음 영향으로 깨끗한 곡선을 구할 수 없어 이 곡선에서 $\Delta \phi_r$ 을 구할 때 추세선을 이용하였다.

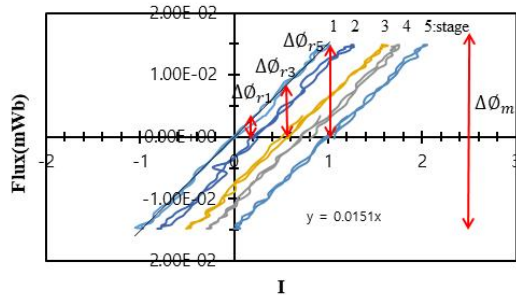


Fig. 7. ϕ -I curve for transformer.

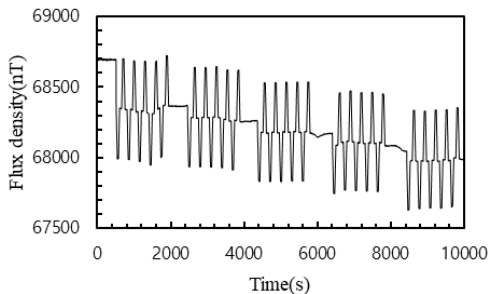
Table 4는 Fig. 7의 ϕ -I곡선에서 구한 $\Delta \phi_m$, $\Delta \phi_r$, 그리고 $\Delta \phi_r / \Delta \phi_m$ 과 Table 3의 10mm에서 $\Delta B_r / \Delta B_m$, 식(1)로 계산한 $\Delta \phi_r$ 을 나타낸 것이다. $\Delta \phi_r / \Delta \phi_m$ 과 Δ

$B_r/\Delta B_m$ 에 근접하고 잔류자속 $\Delta\phi_r$ 의 비교에서도 같은 결과를 나타내었다. 이로부터 누설자속에서 구한 ΔB_r 과 ΔB_m 은 변압기의 $\Delta\phi_r$ 과 $\Delta\phi_m$ 에 의한 것임을 알 수 있고 변압기의 잔류자속을 계산할 때 식(1)을 사용할 수 있음을 알았다.

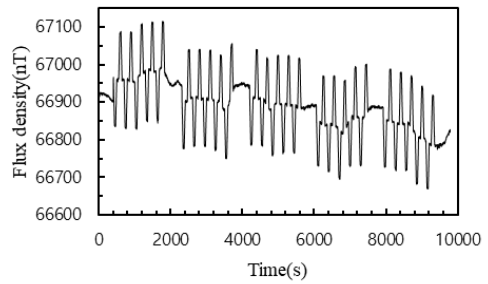
Table 4. $\Delta\phi_m$, $\Delta\phi_r$, $\Delta\phi_r/\Delta\phi_m$ obtained from ϕ -I curve and $\Delta B_r/\Delta B_m$, $\Delta\phi_r$ from this study(10mm distance).

	ϕ -I curve			this study(eq1)	
	$\Delta\phi_m$	$\Delta\phi_r$	$\Delta\phi_r/\Delta\phi_m$	$\Delta B_r/\Delta B_m$	$\Delta\phi_r$
stage1-2	0.0295	0.00368	0.125	0.132	0.00390
stage2-3	0.0297	0.00355	0.120	0.132	0.00392
stage3-4	0.0294	0.00395	0.134	0.131	0.00386
stage4-5	0.0296	0.00401	0.136	0.132	0.00389

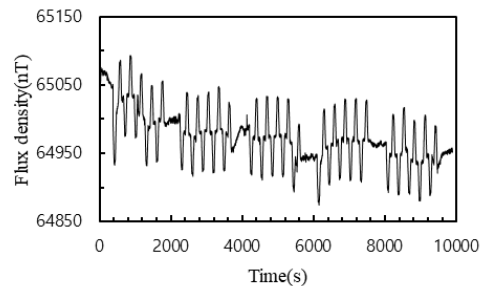
Fig. 8은 변압기로부터의 거리를 200mm~400mm로 변화시켰을 때 측정된 것이다. 200mm 이상의 거리에서는 ΔB_m 과 ΔB_r 의 값은 더욱 작아지므로 센서의 드리프트의 영향이 크게 됨을 알 수 있다. 따라서 이 범위의 거리에서는 식(1)로 잔류자속을 계산할 수가 없었다. 따라서 이 센서를 이용하면 ΔB_r 이 센서의 드리프트 크기보다 적어도 5배 이상이 되어야 하며 측정 최대거리는 100mm로 결정할 수 있다. 용량이 큰 변압기는 동작자속이 훨씬 크기 때문에 이 플럭스게이트 센서로 측정할 수 있는 거리는 더 길어진다. 하지만 다른 센서를 사용할 경우, 분해능(잡음레벨)과 드리프트 특성을 사전에 실험할 필요가 있다. Fig. 9는 측정한 ΔB_m 과 FEM 해석에서 구한 자속밀도를 10mm~100mm의 범위에서 비교한 것이다. 측정과 해석의 조건이 달라 10mm에서 구한 각각의 값으로 규격화시켜 비교하였다. 거리에 따른 계산치와 측정치는 같은 경향을 나타내었다.



(a) 200mm



(b) 300mm



(c) 400mm

Fig. 8. Leakage flux densities measured at different distance from transformer.

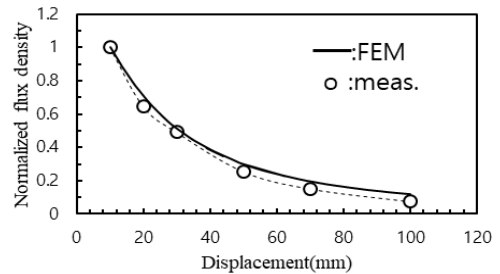


Fig. 9. Comparison of ΔB_m s measured with flux densities calculated by FEM analysis(these values were normalized with the ones for 10mm distance).

4. 결론

본 연구에서는 기존의 연구에서 전달함수를 구하지 않고 변압기의 누설자속을 구하는 방법에 대해 검토하였다. 연구 방법은 최대 누설 자속밀도와 잔류자화에 의한 누설 자속밀도의 비를 변압기의 동작자속에 곱하는 것이다. 이 방법으로 잔류 자속을 결정할 수 있어 본 연구의 타당성이 입증되었다. 측정 거리 10mm~100mm의 범위에서 측정된 잔류 누설 자속밀

도는 센서의 드리프트 80nT보다 약 5배~6배로 컸다. 이것은 측정할 수 있는 최대거리의 결정에 이용할 수 있다. 특성이 다른 자계센서를 이용하여 용량이 큰 변압기에 적용할 때는 사전에 센서의 드리프트에 대한 특성을 파악할 필요가 있다. 앞으로 이 연구 방법을 용량이 큰 변압기에 적용할 예정이다.

REFERENCES

- [1] J. H. Brunke, & K. J. Frohlich. (2001). Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching -Part I: Theoretical Consideration. ber, IEEE, "s", *IEEE Transaction on Power Delivery*, 16(2), 276-280.
DOI : 10.1109/61.915495
- [2] Y. Cui, S. G. Abdulsalam, S. Chen & W. Xu. (2005). A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction-;Part I: Simulation and Experimental Results. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 20(2), 943-949.
DOI : 10.1109/TPWRD.2004.843467
- [3] W. Xu, S. G. Abdulsalam, Y. Cui & X. Liu. (2005). A Sequential Phase Energization Technique for Transformer Inrush Current Reduction-;Part 2: Simulation and Experimental Results. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 20(2), 950-956.
DOI : 10.1109/TPWRD.2004.843465
- [4] Y. Nakachi, R. Hatano, T. Matsubara & Y. Uemura. (2006). Calculation of Transformer Saturated Leakage Inductance based on Field Test Data. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-7.
DOI : 10.1109/PES.2006.1708984
- [5] Y. Corrodi, K. Kamei, H. Koyama, H. Ito & T. Goda. (2011). Influence of System Transients on the Residual Flux of an Unloaded Transformer. *IEEE Power Energy Society. General Meeting*, 1-7.
DOI : 10.1109/PES.2011.6039530
- [6] R. Yacamini & A. Abu-Nasser. (1998). Numerical Calculation of Inrush Current in Single Phase Transformers. *IEE Proc. B, Electr. Power Appl.*, 128(6). 327-334.
DOI : 10.1109/TPWRD.2015.2443560
- [7] D. Cavallera, V. Oiring, J. Coulomb, O. Chadebec, B. Caillault & F. Zgainski. (2014). A New Method to Evaluate Residual Flux Thanks to Leakage Flux, Application to a Transformer. *IEEE Transaction on Magnetics*, 50(2). 7024904.
DOI : 10.1109/TMAG.2013.2282175
- [8] Z. Q. Lei, G. J. Li, W. F. Egelhoff, P. T. Lai & P.P. T. Pong. (2011). Review Noise Source in Magnetic Tunnel Junction Sensor. *IEEE Transaction on Magnetics* 47(3), 602-612.
DOI : 10.1109/TMAG.2010.2100814
- [9] M. Janosek, M. Butta, M. Dressler, E. Saunderson, D. Novotny & C. Fourie. (2020). 1-PT Noise Fluxgate Magnetometer for Geomagnetic Measurements and Unshielded Magnetocardiography. *IEEE Transaction on Magnetics*. 69(5), 2552-2560.
DOI : 10.1109/TIM.2019.2949205
- [10] Y. Watanabe, M. Otsubo, A. Takahashi, T. Yanai, M. Nakano.& H. Hukunaga. (2015). Temperature Characteristics of a Fluxgate Current Sensor with Fe-Ni-Co Ring Core. *IEEE Transaction on Magnetics*. 51(11), 4004104.
DOI : 10.1109/TIM.2015.2438541

김 영 학(Young-Hak Kim)

[정회원]



- 1979년 2월 : 부산수산대학 전자통신공학과(공학사)
- 1991년 3월 : 일본동북대학 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : 일본동북대학 전자공학과(공학석박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 전기공학과 교수
- 관심분야 : 자기공학, 신호처리
- E-Mail : kimyh@pknu.ac.kr