

변압기 포화시 정상 전류 예측에 관한 연구

오승렬*, 윤지호*, 박지훈*, 박종화*
 LS산전(주) 전력시험기술센터*

The Study for Normal Current Estimation under the Saturated Transformer

Seung-Ryle Oh*, Ji-Ho Yun*, Ji-Hun Park*, Jong-Wha Park*
 PT&T, LS Industrial Systems, Co., Ltd.*

Abstract - The saturation of transformer for short-circuit test suppress the peak current value during the test. And such phenomenon effect on the test results occasionally. This paper deals with the induction of the formula to restore the peak current value from the measured data.

Key words: saturation, transformer, short-circuit test

1. 서 론

1 연구 배경

전반적인 전력기기의 차단 용량 증가로 인해 단락 변압기의 정격 용량에 근접하는 단락 및 단시간 시험시에는 변압기 잔류자속에 의한 포화 현상에 의해 전류 파형이 왜곡되는 현상이 간헐적으로 발생하고 있다. 또한 이러한 현상은 시험의 유효성에 영향을 줄 수 있기에 향후 계속적인 연구가 필요한 부분이다. 단락전류를 구성하는 교류성분과 직류성분의 감쇄가 공존할 경우 이러한 포화 현상이 측정된 파형에 얼마만큼 기인한 것인지 가능하기 어려우며 관계식의 비선형성으로 인해 그 결과값의 예측 또한 쉽지가 않다. 이 논문에서는 측정된 결과값으로부터 변압기 포화현상의 기인여부를 예측하며, 만약 결과값이 포화현상에 기인된 것이라면 침두값을 복원하여 포화 정도를 산출한다. 마지막으로 이러한 결과가 향후 진전될 연구의 출발점으로서의 역할을 할 수 있으리라 기대한다.

2. 본 론

2.1 정식화

먼저 R, L 직렬 회로에서 단락 전류식은 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$i(t) = I_m (\sin(\omega t + \theta - \phi)e^{-\alpha t} - \sin(\theta - \phi)e^{-\beta t}) \quad \text{---(1)}$$

여기에서,

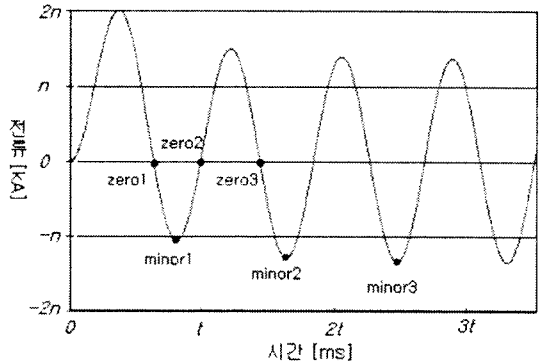
α 교류분 감쇄율 ($1/\tau_{ac}$)

β 직류분 감쇄율 ($1/\tau_{dc}$)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-X}{R}\right)$$

ϕ 투입 위상

통상적으로 변압기 포화현상은 주루프(major loop)에서 발생한다. 따라서 아래의 <그림 1>이 변압기 포화현상에 기인한 파형이며 부루프(minor loop)에서는 변압기 포화현상이 발생하지 않는다고 가정하면 3개의 영점에서의 단락 전류는 각각 식(2), (3), (4)와 같이 표현할 수 있다.



<그림 1. 단락 전류 파형>

$$i(t) = (\sin(\omega t_1 + \theta - \phi)e^{-\alpha t_1} - \sin(\theta - \phi)e^{-\beta t_1}) \quad \text{zero1: ---(2)}$$

$$i(t) = (\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)e^{-\alpha t_2} - \sin(\theta - \phi)e^{-\beta t_2}) \quad \text{zero2: ---(3)}$$

$$i(t) = (\sin(\omega t_3 + \theta - \phi)e^{-\alpha t_3} - \sin(\theta - \phi)e^{-\beta t_3}) \quad \text{zero3: ---(4)}$$

위 식으로부터 식 (2)를 식 (3)으로 나누어 얻어진 식 (5)와, 식 (3)를 식 (4)으로 나누어 얻은 식 (6)에서 최종적으로 아래의 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\left[\frac{\sin(\omega t_1 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)} \right]^{\frac{1}{(t_1 - t_2)}} = e^{(\alpha - \beta)} \quad \text{---(5)}$$

$$\left[\frac{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_3 + \theta - \phi)} \right]^{\frac{1}{(t_2 - t_3)}} = e^{(\alpha - \beta)} \quad \text{---(6)}$$

$$= \left[\frac{\sin(\omega t_1 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)} \right]^{\frac{1}{(t_1 - t_2)}} \left[\frac{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_3 + \theta - \phi)} \right]^{\frac{1}{(t_2 - t_3)}} \quad \text{--- (7)}$$

식 (5)에서 전류 침두값이 발생하는 초기 수 시간(ms)에서는 교류분의 감쇄가 없다고 가정하며, 아래와 같이

$$A = \left[\frac{\sin(\omega t_1 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)} \right], \quad a = \frac{1}{(t_1 - t_2)}$$

$$B = \left[\frac{\sin(\omega t_2 + \theta - \phi)}{\sin(\omega t_3 + \theta - \phi)} \right], \quad b = \frac{1}{(t_2 - t_3)}$$

라 놓고 양변에 로그를 취하면 식 (7)은 다음과 같이 다시 나타 낼 수 있다.

$$a \log A = b \log B \quad \text{--- (8)}$$

2.2 시뮬레이션에 의한 결과 검증

위의 식 (7)에 해를 구하는 과정은 아래와 같이 크게 3 단계로 나눌 수 있다.

단계 1 :

식(7)에서 t_1, t_2, t_3 는 이미 알고 있는 값이므로 $a \log A - b \log B \approx 0$ 을 만족하는 $(\theta - \phi)$ 를 구한다.

단계 2:

$(\theta - \phi)$ 를 식 (5) 또는 식(6)에 대입하여 β 값을 구한다.

단계 3:

위 두 단계에서 구한 $(\theta - \phi)$, β 값과 하나의 minor loop에서의 시간, 전류값을 식(1)에 대입해서 I_m 값을 구한다.(단 식(1)에서 교류성분의 감쇄는 무시하므로 $\alpha=0$)

위의 정식화된 식 검증을 위해 이 논문에서는 먼저 각각 다른 두 가지 조건에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 시행 하였으며, 시뮬레이션에서 얻어진 결과와 식 (7)을 이용해서 얻어진 결과와의 비교를 통해 유도된 식을 검증하고자 한다. 단, 여기에서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 얻어진 전류 침두값은 1/10000°의 분해능(resolving power), 즉 샘플링 속도 216 M/sec에서 얻어진 결과이며, 식 (7)의 해를 얻기 위해 이용된 데이터는 3개의 영점 좌표와 하나의 부루프 꼭지점 좌표이다.

조건 1 : 주파수 = 60 Hz, 인가전압 = 480 V, 단락전류 = 50 kA, 역률 = 0.25 (R/L = 97.3386), 투입 위상각 = 0°

<표 1. 조건 1의 시뮬레이션 결과>

주파수 [Hz]	전압 [V]	전류 [kA]	역률	투입각 [°]	R/L (1/τ)	I _{peak} [kA]
60	480	50	0.25	0	97.3386	103.636

<표 2. 식 (7)에 의한 조건 1의 계산 결과>

분해능	샘플링(초)	(θ-φ)	I _{pk} [kA]	Dif. [%]	역률	β (1/τ)
1/1°	20 k	105.000	99.868	96.325	0.25891	103.4441
1/10°	200 k	104.530	103.635	99.939	0.25039	97.4319
1/100°	2 M	104.460	103.685	99.987	0.25004	97.3560
1/1000°	20 M	284.477	103.702	100.004	0.24999	97.3308
1/20000°	40 M	284.477	103.699	100.000	0.24999	97.3308

조건 2 : 주파수 = 60 Hz, 인가전압 = 415 V, 단락전류 = 100 kA, 역률 = 0.20 (R/L = 96.9539), 투입위상각

주파수 [Hz]	전압 [V]	전류 [kA]	역률	투입각 [°]	R/L (1/τ)	I _{peak} [kA]
60	415	100	0.20	0	76.9539	218.326

= 0°

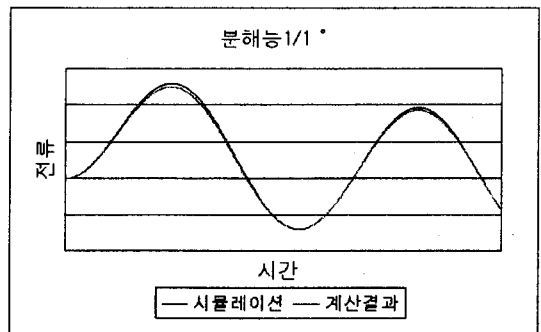
<표 3. 조건 2의 시뮬레이션 결과>

<표 4. 식 (7)에 의한 조건 2의 계산 결과>

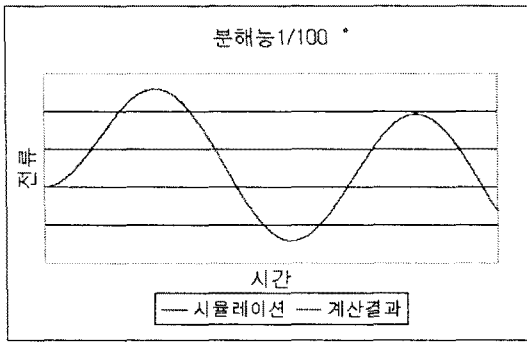
분해능	샘플링(초)	(θ-φ)	I _{pk} [kA]	Dif. [%] (*주1)	역률	β (1/τ)
1/1°	20 k	101.000	236.100	108.141	0.19061	68.8947
1/10°	200 k	101.500	218.453	100.049	0.19937	76.8984
1/100°	2 M	101.540	218.292	99.984	0.20005	76.9700
1/1000°	20 M	101.537	218.320	99.997	0.20000	76.9557
1/20000°	40 M	101.537	218.324	99.999	0.20000	76.9537

(*주1) Dif. = $I_{pk} / I_{peak} \times 100$

아래의 <그림 2>와<그림 3>은 조건 2에 대해서 시뮬레이션 결과와 정식화된 식 8에 의한 결과를 비교한 것이다. 결과 표와 <그림 2>와<그림 3>에서 나타나듯이 분해능 1/1°로 계산된 결과는 Dif.값이 96.325 %로 약간의 차이를 띄게 되지만, 1/100°로 계산된 결과는 Dif.가 99.987 %로 두 값이 거의 일치됨을 알 수 있다.



<그림 2. 조건 1의 결과 비교(분해능=1/1°)>



<그림 3. 조건 1의 결과 비교(분해능=1/100)>

2.3 실측 데이터에 의한 결과 검증

아래의 <표 5>는 실제 측정 데이터와 여기에서 얻어진 영점 및 부루프 꼭지점 데이터를 이용한 식 (7)의 결과를 비교한 것이다. 대체로 실제 측정된 전류 첨두값과 계산된 값이 근접함을 알 수 있으며, 이는 측정 샘플링 속도에 따라 약간의 차이를 나타내고 있다. 이는 샘플링 속도에 따라 영점 및 부루프 꼭지점에 대한 시간은 아주 미세한 차이를 보이게 되지만 정식화된 식은 시간을 변수로 하는 로그함수로 구성되어 있으므로 결과에 미치는 영향은 좀 더 크게 나타나게 된다.

<표 5. 실측 데이터에 의한 결과 비교>

전압-전류(샘플링)	활용데이터	실측값 [kA]	복원값 [kA]	Dif. [%] ^(*)
590 V 18 kA (20 k)	zero 1 Minor 1	37.2	36.4 ^(**)	97.8
	zero 2 Minor 2		36.7	98.7
	zero 3 Minor 3		36.8	98.9
590 V 18 kA (200 k)	zero 1 Minor 1	37.2	37	99.5
	zero 2 Minor 2		36.9	99.2
	zero 3 Minor 3		37	99.5
590 V 30 kA (20 k)	zero 1 Minor 1	86.0	86	100.0
	zero 2 Minor 2		85.8	101.2
	zero 3 Minor 3		86.9	101.4
590 V 30 kA (200 k)	zero 1 Minor 1	86.0	86.5	101.5
	zero 2 Minor 2		86.4	101.4
	zero 3 Minor 3		86.6	101.7
415 V 75 kA (20 k)	zero 1 Minor 1	164.8	162.1	98.4
	zero 2 Minor 2		159.6	96.8
	zero 3 Minor 3		160.3	97.3

(*주1) Dif. = 실측값/복원값 × 100

(*주2) 계산된 36.4 kA 전류값은 3개의 영점과 첫 번째 부루프 꼭지점 좌표를 이용하여 얻어진 결과이다.

3. 결 론

이 논문에서는 단락시험 및 단시간 전류 시험에 사용되는 R-L 직렬회로의 단락 전류식으로 부터 변압기 포화 시에도 영향을 받지 않는 3개의 영점과 부루프 꼭지점 데이터를 이용하여 전류 첨두값을 이끌어 내는 식을 유도하였으며, 이를 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 실제 측정

데이터와의 비교를 통해 정식화된 식을 검증 하였다. 이 논문에서 유도된 식들은 교류 감쇄분에 대해서는 고려되지 않았기에 향후 이에 대한 연구가 진전되어 교류성분에 대한 감쇄도 고려된다면 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Low-voltage switchgear and controlgear-Part 1: General rules" IEC 60947-1 Fourth edition.
- [2] "Low-voltage switchgear and controlgear-Part 2: Circuit-breakers" IEC 60947-2 Third edition.
- [3] "High-voltage switchgear and controlgear-Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers" IEC 62271-100 Edition 1.1.
- [4] Allan Greenwood "Electrical Transients in Power Systems" Second Edition.
- [5] Lou van der Sluis "Transients in Power Systems" 2001