

전력시스템의 배전손실 ②

- 근접효과(Proximity Effect), 표피효과(Skin Effect) 및 와전류 손실(Eddy Current Losses) -

글 / 장 진

세종글로벌(주) 이사 · 기술사

E-mail : sejonglo@kornet.net ☎ 02)3412-7500

One Skin Depth 증가
Rac/Rdc

킬지도 모른다(표 1).

단지 전선의 크기를 증가시키는 것은 도움이 되지 않는다. 특히 다중의 권선층인 경우에, 표피효과와는 달리 적정한 크기 이상의 도선을 사용하면 손실이 대폭 증가할 수 있다. Litz 전선으로 모두 해결할 수 있는 것은 아니며 오히려 손실을 증가 시

(Conductor Thickness) 또는 (Height)에 따른 Rac/Rdc 증가

0.25의 동작주기(Duty Cycle)를 가진 Unipolar Drive와 서로 다른 Conductor Heights를 고려해 보면 표 2와 같다.

표 1 각 Layer와 One Skin Depth 증가에서 Rac/Rdc

Wave shape	Layers	Rac/Rdc	Comments
Bipolar 0.5 DU	1	1.17	양호한 설계
Bipolar 0.5 DU	10	19.5	문제 발생
Bipolar 0.5 DU	100	1860	가망 없음

표 2 도선 두께(Conductor Thickness) 또는 높이(Height)에 따른 Rac/Rdc 증가

Conductor Height	Rac/Rdc @ 1 Layer	Rac/Rdc @ 10 Layers
0.1 SD	1.0	1.013
0.2 SD	1.0	1.19
0.5 SD	1.04	5.35
1.0 SD	1.23	26.5
2.0 SD	2.05	110
5.0 SD	4.88	314

도선 두께 증가는 저항을 크게 증가시킬 수 있다. 여러 층의 설계에서는 너무 얇은 도체가 지나치게 두꺼운 도체보다 더 낫다. One Layer에 대해서는 큰 Wire Size가 안전하며, 손실은 Wire의 직경에 따라 결코 증가하지 않는다. 표피효과 손실도 또한 항상 안전하다.

손실 분석을 위해 파형 그즈파

만일 근접효과 손실에 대한 분석이 정현파라는 추정에 근거하였다면, 권선 또는 도선의 Grouping 손실이 전형적인 PWM 파형에 있어서 약 300%정도 차이가 날 것이다. 전형적인 고입력 라인 조건하에서 손실은 500% 또는 그 이상으로 차이가 생길 것이다. 좁은 Pulse의 Short Circuit 조건에 대해서는 권선 손실(Winding Loss) 추정치는 약 12:1 정도로 차이가 생길 것이다.

손실은 어떻게 분석되는가?

많은 경우에 있어서 근접효과는 전체적인 선로 손실을 좌우한다. 그러나 근접효과에 대해서 얻을 수 있는 자료가 거의 없는 것이 사실이다. 많은 자계(Magnetic) 및 전력공급(Power Supply) 관련 서적들을 보면 이런 사항들을 전혀 다루지 않고 있다. 결과적으로, 경험이 있는 전기 기술자들조차도 근접효과를 전혀 고려하고 있지 않는 실정이다.

Closed Form 와전류 손실 방정식은 도선을 임의로 놓은 경우에는 얻어질 수 없다. Dowell(Ref.1)은 대부분의 설계에서 자

계는 축(Axial) 또는 수평 방향이 아니라, 방사상(Radial) 또는 높이(Height) 방향으로 변한다는 데에 주목했다. 이러한 가정으로 인해 바람직한 Closed Form의 손실 방정식을 얻게 되었다. 이러한 가정을 만족시키지 않으면 예상되는 것 이상의 손실의 증가를 초래하며 “나쁜” 설계로 간주할 수 있다. EASI의 계산 방식은 정확한 근접효과 손실을 결정하는 데 있어서 우리 자신의 경험으로 도출해 낸 데이터 뿐 아니라 Dowell의 발견 내용을 포함하는 것이다.

두개의 중요한 논문이 Dowell의 업적을 뒷받침하고 있다. 다음 (Ref.2)은 고조파 분석에 대한 방정식을 나타내고 있으며 그 결과는 광범위하고 실질적인 상황에 적용된다. 일련의 정상화된 그래프가 만들어지면 컴퓨터가 없어도 분석이 가능하다 (이 방법은 1986년 이전에는 일반화 되지 않았음).

대부분의 EASI 시스템이 실제의 PWM과 다른 비선형 부하와 더불어 산업시설에 적용되어 온 이래로 EASI는 표피효과, 근접효과 및 와전류 효과에 대한 계산 시스템을 신중하게 확장하여 왔고, 라인 주파수 전류 이상으로 적절히 비중을 두어 현장에서 얻어진 고조파 데이터에 근거하여 총체적인 손실을 규명해 왔다. Dowell은 또한 자계는 Winding 표면에서 균일하다고 가정했다. 층(Layer)의 각 부분에서의 접선 자계의 크기를 알고 있다면, 한 개의 층에서의 손실을 알 수 있다는 것을 세 번째 논문에서 보여주고 있다(Ref.3).

높이(Height) 방향으로의 자력의 변화를 보여주는 단순한 자계 Plot는 필요한 크기를 가시화 하기 위하여 사용된다(EASI는 원래 단층 변압기 권선을 모델링하기로 의도 되었던 Predictors를 근거로 한 Dowell의 접선 자계크기와 교류 배전설비에서 매

우 근접해 있는 복수의 전선 도체의 모델링 사이의 상관 관계를 정립하였다).

참고 문헌으로 도움을 얻는다 해도, 이러한 분석이 간단하지 않다. 세 번째 논문에서 개발된 개념을 이용하면 하기 방정식은 어느 한 주파수에서 어느 한 층에 대한 손실을 나타낸다.

$$\text{Loss} = \text{Area} \frac{H^2}{2\delta\sigma} [(1+HrMn)-4 HrDn]$$

여기서,

- Area : 전체도체 표면 면적
= (Winding 폭) × (Winding 길이)
- H : High Side 자계밀도
- Hr : One Winding에 대한 Field Ratio

Mn 과 Dn은 Skin Depth, 도체두께 및 표준 쌍곡선 공식을 이용하면 아래와 같이 정의된다.

$$Mn \equiv \frac{\text{SINH}(2\phi) + \text{SIN}(2\phi)}{\text{COSH}(2\phi) - \text{COS}(2\phi)}$$

$$Dn \equiv \frac{\text{SINH}(2\phi)\text{COS}(\phi) + \text{COSH}(\phi)\text{SIN}(\phi)}{\text{COSH}(2\phi) - \text{COS}(2\phi)}$$

그리고

$$\phi \equiv \frac{Ht}{\delta}$$

여기서, ϕ 는 층(Layer) 또는 Skin Depth에서 도체의 Height임(100kHz에서 동선의 Skin Depth는 대략 0.0084 inch 임)

$$\delta \equiv \sqrt{\frac{S}{2\pi f m_0 \sigma}}$$

어떤 주파수에서 Skin Depth 정수, 이때 m_0 는 material의 침투성, S는 material의 전도성

이 손실 방정식은 순수한 자계의 형성을

고려하여 변압기 권선의 모든 층(Layer)에 적용되어야 하며 또는 평가되는 모든 쌍의 전선 도체에 적용되어야 한다.

그럼에도 불구하고 비정현파에 있어서 이 방정식은 모든 중요한 고조파에서 평가되어야 한다. 50% Duty Cycle에서 50nS의 상승 Time을 갖는 100kHz Pulse에 대해 전체 손실을 정확하게 찾아내기 위해서는 약 200개의 고조파가 분석되어야만 한다. 그러나 대부분의 전기 기술자는 이 공식을 적용하지 않는다.

EASI는 현장 시험, 제품 적용, 컴퓨터 모델링 및 S/W 개발 시스템 등에 대한 많은 투자를 하였고, 이것은 선로손실 모델링의 수학적 계산을 위하여 우리의 예측적 기법을 적용하는 데에 필요하며 또한 이것은 효율적인 전력 시스템 설계를 위하여 우리가 수행하는 각각의 예측적 모델링에 위의 수학적 개념을 포함하기 위한 것이다.



변압기 (Transformers)

변압기를 설계함에 있어서 Layer(층)수와 조직은 중요한 열쇠가 된다. 처음에 Core와 Turn수를 선택하는데 이것은 필요한 층 Layer수를 최소화 하도록 선택한다.

최상의 Core는 긴 권선의 폭에 대한 높이 비율을 갖고 있으며, 이것은 도체가 더 많이 퍼져 나갈 수 있도록 한다. Layer의 수를 줄이기 위하여 가동 주파수를 올리는 것이 유익하다.

역설적으로, 일단 Core와 Turn 수가 결

정되고 Layer수를 증가 시키면 손실을 감소시킨다. 비록 Layer의 증가가 직류저항에 대한 교류저항의 비율에는 해롭다 할지라도, 각 개별 Layer가 얇아지더라도 최적의 전체 Height는 증가한다.

이것은 부가적인 동선 면적을 증가시키고 직류저항을 감소시킨다. 이것은 보빈(Bobbin) 이 요구되는 추가의 높이를 허용할 때만 적용된다.

층 수의 최대화는 가능하다면 박막의 권선을 사용함으로써 쉽게 성취할 수가 있다. 10개의 박막의 층은 각각의 두께가 최적이라고 가정하면 하나의 층에 있는 10개의 원형 전선 보다 더 낮은 손실을 갖게 된다. 박막의 권선은 여러 개의 층 때문에 높은 Rac/Rdc 비율을 갖지만, 더 높은 총 최적 높이(Total Optimum Height)와 전체적인 낮은 순(Net) 교류 저항을 갖는다.

권선을 끼워 넣는 것은 유효한 Layer수를 감소시킴으로써 근접효과를 줄일 것이다. 이러한 기술을 이용하여 어느 정도의 1차측 Layer가 감겨지고 또 어느 정도의 2차측 Layer가 감겨지고 또 어느 정도의 1차측 Layer가 감겨지고 하는 작업이 반복된다. 이것은 각 Winding Section에서 유효한 층의 수를 감소시키고 그 결과 자체가 형성 된다.

추가적으로, 도체성 물질(Termination, Shield 등)을 자계에서 멀리 유지해야 한다. 만일 Shield가 필요하다면 Skin Depth 두께보다 더 작게 유지해야 한다.

현재의 설비에서 교정해야 할 변압기가 없는 경우에 순전류를 감소시키면 변압기나 Motor, 안정기 및 전력 공급장치와 같은 Magnetic Device 내에서 발생하는 근접효과 및 와전류 손실을 상당히 줄일 수 있다.

Distribution Systems :

Pipe Conduit안에 설치된 원형의 전선 도체로 구성된 전력 배전 시스템에서 상당한 근접효과 손실이 있다. 시스템이 상당한 수의 PWM 및 다른 비선형 부하에 전력을 공급하며 선로 주파수 보다 높은 주파수의 전류를 공급할 경우에 표피효과 손실은 근접효과 손실과 결합하여 동작 AC 저항이 DC 저항 보다 훨씬 크게 된다. 변압기와 마찬가지로, 손실을 결정하는 계산적 접근은 표피효과, 근접효과 및 와전류 손실을 감소시키는 프로그램을 통하여 Line 주파수 전류 및 고조파 전류를 제거하거나 감소시키기 위한 결정을 내릴 수 있는 토대를 제공할 수 있다.

Summary :

매우 경험이 많은 기술자들조차도 자계 및 배전 선로에서 근접효과를 계산하거나 교정하는 직접적인 지식을 거의 갖고 있지 않다. 권선의 단순한 와전류 손실에 대한 지식은 어느 정도 알려져 있는 반면, 설비의 전력배전 시스템에서 근접효과, 표피효과 및 와전류 손실에 대한 전체적인 부하의 복합적인 효과를 계산 및 교정을 위하여는 상당한 시간을 요하며 때로는 특별한 독점적 지식과 기술을 요구한다.

수많은 공장의 기술자들은 시스템을 계획하고 유지·보수함에 있어서 이러한 실질적인 전기적 시스템 손실을 무시한다. 문제를 더 악화시키는 것은 설비의 전기적 시스템 손실을 제거함에 있어서 잘못된 테스트 방법을 계속해서 사용하는 것이다.

이 방법은 무부하의 결선상태에서 point to point 직류저항을 측정하는 단순한 방법으로 가장 널리 사용되고 있으며 실제의 AC 전부하 저항보다 더 작은 크기의 결과

치를 종종 산출하고 있다.

EASI는 전체 부하의 전력시스템 손실에 대하여 체계적으로 평가하고 교정하는 데에 전문기술 인력과 함께 전문화되어 있다. 1978년 이래로 70,000 여개 설비의 전력 시스템으로부터 모든 형태의 전기적 손실에 대한 분석을 수행하면서 수집해 온 데이터를 보유하고 있다. 고객의 각 설비에서 발생하는 실질적인 근접효과, 표피효과, 와전류 및 단순한 AC 선손실 등을 정확히 규명하고 우리가 현재 사용하고 있는 Systems Design Program을 수립하기 위하여 점점 더 발달하고 있는 세계적인 산업 시설의 연구 및 논문 등을 활용하여 프로젝트를 건설하게 추진해 왔다.

EASI는 실제 부하전류 및 고조파 전류, 무효전류 등을 제거하거나 감소시키기 위하여 비교적 단순한 방법으로 설비에서의 전기적 손실을 줄여 팔목할 만한 전력 절감을 실현하여 상당한 경제적 이익을 고객에게 제공할 뿐 아니라 확실하게 Project를 수행하여 신속한 재정적 투자회수를 실현하고 있다.

● 참고 문헌

- 1) P.L.Dowell, "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings, "Próc. IEE, Vol 113 No.8, August 1966
- 2) Bruce Carsten, "High Frequency Conductor Losses in Switchmode Magnetics", High Frequency Power Conversion Conference Proceedings, CA, May 1986
- 3) J.P. Vandelay, "A Novel Approach for Minimizing High Frequency Transformer Copper Loss, "0275-9306/87/0000 1987 IEEE
- 4) KO Systems, "Proxy, A Proximity and Skin Effect Analysis Program," 10437 Laramie Ave, Chatsworth, CA, 818 341 3864

경부시책 소개

전국 신지식인 모범사례 공모전

제2의건국범국민추진위원회에서는 21세기 지식기반사회가 요구하는 새로운 인재와 의식 개혁운동의 선도자로 활동할 신지식인의 발굴과 기존에 선정된 신지식인들의 사기진작을 위하여 신지식인 모범사례 공모전을 다음과 같이 개최합니다.

* 공모대상

- 기존에 발굴·선정된 신지식인
- 공모기간 동안에 새로이 선정된 신지식인
- * 신지식인 선정은 행정기관과 상근직원 5인 이상의 기업·단체에서 할 수 있음

* 공모기간 : 6. 30 ~ 7. 31

* 기타 자세한 문의는 제2건국위 홈페이지(www.reko.go.kr) 참조

* 문 의 : 제2건국범국민추진위원회(☎ 02)734-1865~6), 시도 및 시군구 제2건국추진반