전력시스템의 배전손실 ①

- 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

서 론

교류의 배전설비를 운전함에 있어서 전력의 손실을 계산하는 데에는 많은 혼동이 있어 왔다. 많은 간행물을 통하여 이와 관련된 지식을 접할 수 있음에도 불구하고, 산업 시설 및 유틸리티에서의 많은 기술자들은 그들이 알고 있는 전선 사양 및 이미 알려진 DC 저항 값 등을 기초로 하여 단순하게 선로 손실을 계산하려고 시도한다. 따라서 가능한 에너지 절감 방법에 대한 토의가 진행되면, 이런 부류의 사람들은 수익성이 우수한 에너지 절감 프로젝트가 사실상 수행이 되지 못하도록 종종 문제를 발생시키곤 한다.

EASI(Energy Automation System Institute)는 전체적으로 부하가 걸려 운전되고 있는 상업용 또는 산업용 전력 시스템의 AC 배전 손실(Distribution Losses)을 규명하고 이를 제거 및 감소시키는 데에 있어서 특유한 전문적 기술을 적용하고 있다.

본고는 우리의 모든 작업이 표준화 되고 공지된 계산 방법에 근거하여 작성되었음을 알리기 위한 노력이며, 또한 교류 전력 시스템을 운전함에 있어서 전력의 손실과 관련하여 오랫동안 인정되고 정량화(Quantified) 된 현상을 고려하였다. 특히, 배전 선로 및 자계(Magnetics)에서의 근접효과 손실(Proximity Effect Losses) 및 와전류 손실(Eddy Current Losses)에 초점을 두어 작성되었다.

근접효과 (Proximity Effect)

두 개의 평행으로 위치한 원형 전선에 교류 전류가 흐를 때, 교류 전류는 도선(Conductors)의 주위를 균일하게 분포되어 흐르지 않는다. 각 전선의 자계(Magnetic Fields)는 다른 전선의 전류 흐름에 영향을 미치며, 이것은 전류의 흐름이 도선 내에서 균일하지 않게 만들 뿐만 아니라 도선의 저항을 증가 시킨다. 평행하게 놓인 원형의 전선에서 나타나는 이 현상을 우리는 근접효과(Proximity Effect)라고 부른다.

근접효과 및 표피효과(Skin Effect)와 관련된 배전 손실을 규명하기 위하여, EASI는 EASI만의 특유한 수학적 프로그램을 적용하고 있다. EASI는 전기적 폐회로 설비의 배전 시스템과 관련된 도선, 개폐 장치, 보호 장치 및 자계 설비의 권선 등에서 발생하는 교류 손실을 정량화(Quantifies) 한다. 근접효과에 관한 분석이 없으면 실제의 선로 손실은 예상되는 DC 손실보다 훨씬 더 크게 측정된다.

교류 도선과 자계 설비(Magnetic Devices)에서의 근접효과 손실

근접효과(Proximity Effect)는 DC 저항 또는 표피효과(Skin Effect)에 의해서 발생하는 것 이상으로 자화손(Magnetic Loss)을 대폭 증가 시키는 교류 전력 시스템에서의 현상이다. 일련의 쌍곡선 방정식의 형태로 Closed Form 분석을 하면 3-D 제한 분석 프로그램으로 가지 않고서도 가능하다. 그러나 지배하는 방정식에 전체적인 고조파 분석이 사용되어야 하며, 그렇지 않다면 손실 추정은 10배 정도까지 틀릴 수 있다. 결과적으로 EASI는 설비의 배전 시스템 손실에 대한 설계 변경 결과를 신속히 계산할 수 있도록 EASI만의 고유한 그리고 독점적인 컴퓨터 프로그램을 사용한다.

근접효과(Proximity Effect) 란 무엇인가 ?

대부분의 전기 기술자들은 높은 주파수에서는 전류가 도선의 바깥 쪽으로 흐르는 경향이 있다는 사실을 알고 있다. 표피효과로 인하여 전류의 분포는 도선 자신의 자계에 영향을 받게 되고 또한 손실을 증가 시킨다. 근접효과는 이와 유사하지만, 복합적인 전류가 흐르는 다수의 도선 상호간의 영향을 말한다. 이들의 상호작용은 도선 내에서의 불평형 전류의 흐름을 일으키며 손실을 증가 시키게 된다.

근접효과와 표피효과는 밀폐된 파이프 도관(Pipe Conduit) 안에 있는 별개의 원형 도체 전선들로 구성된 AC 전력 배전 시스템에서 뿐만 아니라, 변압기나 인덕터(Inductor) 의 주요 손실원이 된다. 이 효과가 유도성의 순환 전류(Eddy Current)로서 또는 경계 조건(Boundary Condition)을 만족하는 전류의 재분포로서 가시화 되든지 간에, 그 결과는 DC 저항 단독으로 발생하는 것 이상으로 손실이 증가하며 불균등한(Non-Uniform) 전류의 분포로 나타난다. 그림 1~3은 전류가 동일한 방향으로 흘렀을 때와 반대 방향으로 흘렀을 때의 표피효과와 근접효과에 의한 전형적인 전류의 분포를 보여준다.

근접효과는 특히 부담스러운 문제로 작용한다. 이것은 표피효과보다 더 심각하고, 근접전류 손실에 대한 분석은 모호하며 수학적으로도 어려운 문제이다. 이런 이유로

근접효과는 자계설계 분야에서 가장 소홀히 되는 분야 중의 하나이다. 그러나 코아(Core) 손실과 근접효과는 교류 배전 시스템에서 자화 설비 설계 시에 가장 중요하게 고려해야 할 두 가지 사항이라 할 수 있다. 운전 자속 밀도(Operating Flux Density)가 높은 주파수에 제한되는 코아(Core) 손실인 것과 마찬가지로, 전선 전류 밀도(Wire Current Density) 또한 직류 저항이 아니라 근접효과에 의해 제한되며 달라진다.

EASI는 오랫동안 근접효과, 표피효과에 대한 손실의 예측, 분석 및 계산에 대한 상당한 연구를 수행하여 왔으며, 여기에서 얻어진 사실들을 효율적인 에너지 절감 설계를 위한 계산에 적용하여 왔다.

와전류 손실은 단지 높은 주파수에 제한 해당되는 것이 아니다.

와전류 손실은 단지 높은 주파수 설계에만 국한되는 것이 아니다. 근접효과는 도선 두께가 표피 두께(Skin Depth)의 상당한 부분을 차지할 때 발생할 수 있다. 대형의 60Hz 전력용 변압기나 한 쌍의 도선은 근접효과 손실이 발생하지만, 반면에 아주 소형의 높은 주파수의 변압기나 일련

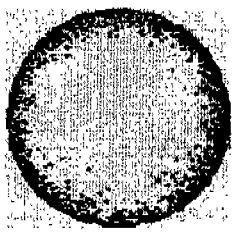

그림 1 표피효과에 의한 전류 분포

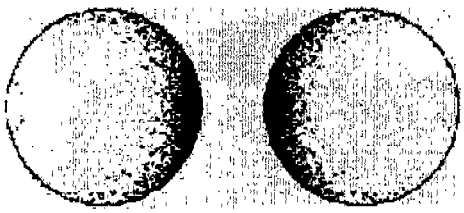

그림 2 전류가 동일한 방향으로 흘렀을 때의 근접효과에 의한 전류 분포

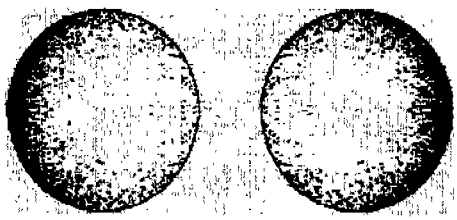

그림 3 전류가 반대 방향으로 흘렀을 때의 근접효과에 의한 전류 분포

의 도선은 그렇지 못하다.

전류가 흐르지 않는 도체들 조차도 외부의 교류자계 속에 들어가면 와전류 손실을 경험하게 된다. 어느 한 시점에 배전반 내의 차폐된 인접 도선일 수도 있고 혹은 동작하고 있지 않는 모터 권선이나 변압기가 될 수도 있다. 표피효과와 근접효과는 변압기, 인덕터, 한 그룹의 도체 전선 또는 AC 자화설비 내에서의 모든 전도성 소자에서 매우 중요하다.

용어설명

표피 두께(Skin Depth)란 모든 전류가 동일한 손실을 갖고 흘러야만 하는 도선에서 동가의 전류관통 깊이(Current Penetration Depth)를 말한다. Skin Depth 는 오직 주파수 및 도선 특성과 함수관계를 가진다. Skin Depth의 크기를 측정함으로써 한 퍼래미터로서의 주파수를 고려치 않아도 된다.

DC 저항(Rdc)이란 높은 주파수의 영향을 무시하는 기본적인 저항을 말한다. 교류저항(Rac)은 주어진 파형에 대한 전체의 유효 저항을 말하며, 실제의 손실을 알아내기 위하여 사용된다. 저항 또는 손실이 얼마나 많이 증가하는지는 Rac : Rdc의 비율에 의하여 결정된다.

권선(Winding)이란 동일한 전류와 파형을 공유하는 일련의 권선 또는 한 그룹의 인접한 도선을 말한다. 하나의 권선 구간(Winding Section)은 어떤 다른 도선에 의해 방해를 받지 않는 권선의 한 부분을 말한다. 동일한 물리적 평면상에 존재하는 권선의 일부분 또는 일련의 도선들을 층(Layer)이라 부른다.

각각의 권선 엘리먼트(Wire)는 도선(Conductor)이다. 도선 또는 권선의 높이(Height)는 코아(Core)의 축 중앙(Axial Center)에서 우측 각도로 측정된다.

접선자계(Tangential Magnetic Field)는 권선의 표면을 가로지르는 자계이다. 이것은 균일하다고 가정된다. 자계율(Field Ratio)은 도선의 상부와 하부 표면에서의 접선 자계의 비율을 말한다.

근접효과로 손실이 대폭 증가할 수

다음은 변압기의 설계와 관련된 내용이다. 긴 파이프 도관, 복잡한 접속상자(Junction Box) 또는 잘 짜여진 Breaker Panel 내에 설치된 서로 가깝게 근접해 있는 복합적인 전선 도체들에서는 동일한 원리가 동일하게 적용된다.

한 개의 권선층(Winding Layer)과 1 Skin Depth에 대하여, 근접효과 및 표피효과의 계산된 손실은 대략적으로 동일한 크기를 갖고 있다. 정의에 의하면, 표피효과는 권선 구조에 따라 변화하지 않는다.

근접효과에서 보면 복합적 권선층은 자계의 형성을 증가시키고 따라서 손실을 증가시킨다. 실제적으로 근접효과는 여러 층(Multi Layer)의 설계가 시도될 때까지는 주목을 받지 못할 수도 있다.

표피효과에 근거한 예측치의 10배 이상으로 손실이 갑자기 증가할 수도 있다.

Rac/Rdc는 저항손실 증가율인 경우(모든 파형 주파수는 100kHz 임), 0.5 의 동작주기(Duty Cycle: DU)를 가진 Bipolar PWM Drive에 대한 경우는 다음호에 알아보자.

다음호에 계속 됩니다