

## 배전용 변압기 %임피던스 운영에 관한 고찰

나동채\*, 김동명  
한국전력공사 전력연구원

### The Study on Improvement of %Impedance Management in Distribution Transformers

Dong-Chae Ra, Dong-Myung Kim  
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

**Abstract** - 변압기의 %임피던스는 무부하손, 부하손, 효율, 전압변동율 등과 밀접한 관계가 있으며, %임피던스의 크기에 따라 변압기 2차에서 단락고장이 발생할 경우에 고장전류의 크기가 결정되어 변압기 보호장치 선정의 기준이 된다. 특히 전압변동율과 직접 관계가 있어 저압 배전선로의 규정전압을 유지하기 위해서 1992년부터 주상변압기의 용량별로 일정범위를 규정하여 운영하고 있다. 규정 전압의 관리측면에서는 %임피던스가 가급적 낮게 운영하여야 하나, 고장전류의 증가에 따른 변압기 단락강도의 개선이 수반되어 변압기 제조기술에 제약요인이 있다. 이에 따라 주상변압기의 %임피던스와 전압변동율을 중심으로 현재 운영하고 있는 각종 배전용 변압기의 특성값을 분석하고 이에 대한 개선방안을 모색하였다.

#### 1. 서 론

2007년 말 현재 우리나라의 배전용 변압기는 지중용 30,345대를 포함하여 1,859,245대가 운전되고 있고 매년 약 4% 정도 증가되고 있다.

최근 다양한 연구개발 프로그램에 따라 변압기의 설계 및 제조기술이 많은 발전을 거듭하여 왔으나, 아직도 일부 제조회사에서는 제조기술의 부족으로 단락강도 미달에 의한 변압기의 소손고장이 많이 발생되고 있는 실정이다. 2003년부터 2007. 9월까지 한국전력공사에서 시행한 주상변압기의 시험검사 결과를 살펴보면 총 327건의 불합격 내역 중 95건이 단락강도 미달에 의한 것으로 약 30%를 점유하고 있다.

변압기의 %임피던스는 무부하손, 부하손, 효율, 전압변동율 등과 밀접한 관계가 있으며, 전력회사의 배전설비 운영측면에서 손실, 전압변동율, 병렬운전 조건 등을 결정하는 요소이고, 변압기 2차에서 단락고장이 발생하였을 때 %임피던스에 따라 고장전류의 크기가 결정되어 보호장치의 차단용량이 선정된다.

현재의 주상변압기 구매규격의 %임피던스 운영기준은 1991. 4월 한국전력공사 전력연구원에서 수행한 '주상변압기 절연과피 감소대책 연구'의 결과를 반영하여 적용하고 있다. 본 연구에서는 배전용 변압기의 %임피던스와 전압변동율과의 상관관계를 검토하고 변압기의 제반 특성값에 대한 개선방안을 모색하고자 한다.

### 2. 배전용 변압기의 %임피던스 및 배전선로 전압강하

#### 2.1 배전용 변압기 %임피던스 운영현황

배전용 변압기의 특성값은 1968년도에 제정된 일단절지 주상변압기 구매규격을 제정하면서 효율, 전압변동율, 무부하전류 및 무부하손을 규정하였으나, %임피던스에 대한 적용기준은 없었다. 이는 1991. 4월에 개발된 자기단절형 주상변압기 등 과거 G9급 규소강판을 사용하는 주상변압기 구매규격에 일반적으로 적용하여 왔다.

1991년 한국전력공사 전력연구원에서 '주상변압기 절연과피 감소대책 연구' 과제를 수행하면서 12개 제조업체의 일단절지 주상변압기 %임피던스를 조사한 결과에 따르면 %임피던스의 평균값은 대체로 4% 정도를 유지하고 있었으나, 최소 1.8%에서부터 6.3%까지 넓은 변동 폭을 가지고 있었다. 당시 KS규격에서는 %임피던스를 규정하지 않으나 전력회사의 입장에서 규정 전압을 유지하기 위하여 필요하므로, 한국전력공사의 단락강도 시험기준인 정격전류의 40배(5~30kVA) 및 35배(31~100kVA)와 %임피던스의 허용범위 10%를 고려하여, 시험전류가 단락강도 시험기준을 초과하지 않도록 5~30kVA는 2.8%, 31~100kVA는 3.2% 이상이 되도록 제시하였다.

이에 따라 1992. 12월에 제정된 G6급 저손실형 주상변압기 구매규격이 제정되면서부터 기존 일단절지 주상변압기 구매규격의 각종 특성값에 %임피던스 기준값을 추가하여 30kVA 이하는 2.8±10%, 50~100kVA는 3.2±10%로 규정하였다.

**<표 1> %임피던스 운영기준 (한국전력 구매규격)**

| 구 분                    | 변압기 용량     | %임피던스 | 허용기준 |
|------------------------|------------|-------|------|
| 일반형 주상변압기<br>(아몰퍼스 포함) | 30kVA 이하   | 2.8%  | ±10% |
|                        | 50~100kVA  | 3.2%  |      |
|                        | 150kVA     | 4.0%  |      |
| 지상형 변압기                | 150kVA 이하  | 4.0%  | ±10% |
|                        | 300~500kVA | 4.5%  |      |

1996. 10월에 제정된 아몰퍼스 주상변압기 구매규격도 이를 기초로 저손실형 주상변압기의 구매규격과 같이 %임피던스를 규정하여 왔다. G6급, 아몰퍼스 등의 철심재료를 사용하고 %임피던스 운영기준이 제정되면서, 10~100kVA용량의 주상변압기의 전압변동율은 2.3~1.6%에서 2.0~1.3% 수준으로 개선되었으며, 무부하손실의 대폭 감소와 함께 효율은 96.7%~98.2%에서 97.8%~98.6%로 최대 1.1%까지 향상되었다.

#### 2.2 배전용 변압기 단락강도 시험기준

변압기 단락강도 시험에 있어서 대칭 단락전류는 기본적으로 해당 변압기의 %임피던스를 기준으로 계산하여 시험하고 있으나, 용량 500kVA 이하의 배전용 변압기의 경우에는 낮은 임피던스에 의한 과도한 단락전류를 제한할 목적으로 정격전류에 일정한 배수를 정하여 시험하고 있다. 한국전력공사의 단락강도 시험기준은 <표2>와 같이 IEEE std C57.12.00를 인용하여 변압기 단락강도 시험규격을 제정하여 적용하고 있다. 단락강도 시험기준에서 변압기 용량에 따라 일부 차이가 있으나 국내에서 사용하고 있는 표준용량으로 환산하여 시험기준을 설정한 것을 알 수 있다.

**<표 2> 배전용 변압기의 단락강도 용량 (단상 기준)**

| 변압기 용량 (kVA) | 단락강도 용량<br>(기준전류 배수) | 비 고<br>(IEEE 기준용량) |
|--------------|----------------------|--------------------|
| 5~30         | 40                   | 5~25               |
| 31~100       | 35                   | 37.5~110           |
| 150~500      | 25                   | 167~500            |

한편, 'KSC/IEC 60076-5(2002) 전력용 변압기 제5부 : 단락강도 시험기준'에 따르면, 배전용 변압기에 적용하고 있는 용량(25~630kVA)의 경우에는 정격전류에서 변압기 단락회로의 %임피던스를 최소 4.0%로 규정하고 있고, 더 낮은 값이 필요하다면 제조자와 구매자의 협의에 따르도록 하였다.

#### 2.3 배전선로의 전압강하 및 변압기의 전압변동율

배전계통의 전압은 배전용 변전소의 송출 전압, 특고압 배전선로의 전압강하, 배전용 변압기의 탭, 저압선로 및 인입선의 전압강하에 의하여 결정된다.

배전용 변전소의 1차 배전선로 송출전압은 배전선로의 등가 임피던스, 부하 중심점의 전압 등 미리 정해진 전압 조정요소에 의해 부하전류의 크기에 따라 10% 내외로 결정되며, 저압 배전선로는 최대부하를 기준으로 주상변압기 내부의 전압강하 2%, 저압선로 6% 및 인입선 2%로 배분하여 총 10% 정도의 전압강하를 한도로 구성하고 있다.

이러한 배전계통의 설계개념으로 배전용 변압기는 규정된 전압강하 범위 이내로 유지할 수 있도록 제작되어야 하며, 저압선로는 적정 굵기의 전선을 선정하고 경간수를 제한하는 등의 방법으로 기준전압을 유지하고, 인입선은 적정 굵기를 선정하며 인입선의 거리를 제한하여 기준전압을 유지하도록 설계하고 있다.

과거의 일단점 주상변압기 구매규격의 전압변동율은 2.6~1.6%로 운영하여 왔으나, 92.12월 저손실형 주상변압기 구매규격으로 제정하여 현재까지 운영하고 있는 일반형 주상변압기 구매규격의 전압변동율은 배전계통에서 정한 전압관리 개념의 취지에 따라 <표3>과 같이 2.0% 이하로 규정되어 있다.

**<표 3> 일반형 주상변압기의 특성값 (한국전력 구매규격)**

| 정격출력 (kVA) | 효율 (%)  | 전압변동율 (%) | 무부하전류 (%) | 무부하손 (W) | 부하손 (W) |
|------------|---------|-----------|-----------|----------|---------|
| 10         | 97.8 이상 | 2.0 이하    | 1.2 이하    | 35이하     | 189이하   |
| 20         | 98.1 이상 | 1.7 이하    | 1.2 이하    | 60이하     | 327이하   |
| 30         | 98.3 이상 | 1.5 이하    | 1.0 이하    | 80이하     | 436이하   |
| 50         | 98.5 이상 | 1.4 이하    | 0.8 이하    | 120이하    | 641이하   |
| 75         | 98.5 이상 | 1.4 이하    | 0.8 이하    | 170이하    | 972이하   |
| 100        | 98.6 이상 | 1.3 이하    | 0.7 이하    | 209이하    | 1,210이하 |

그러나, 역율이 100%일 경우에는 배전계통에서 규정한 전압강하 배분 기준 2% 이내로 문제가 없지만, 전기공급약관에서 정한 기준역율인 90%를 적용할 경우에는 <표4>와 같이 전압변동율이 최대 2.6%까지 증가되어 최대부하에서는 배전계통의 기준 전압강하율을 초과하게 된다.

여기서 변압기의 전압변동율은 %저항, %임피던스 및 역율의 함수로서 다음의 공식에 의하여 산출하였다.

$$\varepsilon(\%) = q_r \cos\phi + q_x \sin\phi + \frac{(q_x \cos\phi - q_r \sin\phi)^2}{200}$$

**<표 4> 일반형 주상변압기의 전압변동을 계산값**

| 용 량 (kVA) | 효 율 (%) | 부하손 (W) | 무부하 손(W) | 임피던스 (%) | 전압변동율(%) |         |
|-----------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
|           |         |         |          |          | (역율1)    | (역율0.9) |
| 10        | 97.80   | 189     | 35       | 2.8      | 1.91     | 2.60    |
| 20        | 98.10   | 327     | 60       | 2.8      | 1.66     | 2.46    |
| 30        | 98.30   | 436     | 80       | 2.8      | 1.48     | 2.35    |
| 50        | 98.50   | 641     | 120      | 3.2      | 1.32     | 2.43    |
| 75        | 98.50   | 972     | 170      | 3.2      | 1.34     | 2.44    |
| 100       | 98.60   | 1,210   | 209      | 3.2      | 1.25     | 2.38    |

### 3. 배전용 주상변압기 성능 개선방안

<표5>는 2008년도 현재 제작업체에서 실제 납품하는 일반형 주상변압기 75kVA의 특성값이다. 특성값은 10개 업체의 평균값으로, 무부하손실은 대체적으로 구매규격 대비 87.8% 수준, 전압변동율은 기준값 1.4% 대비 1.27%로 다소 여유가 있으며, 부하손, 효율 및 %임피던스의 평균값은 기준값에 거의 근접하여 제작하고 있는 것을 알 수 있다.

**<표 5> 일반형 주상변압기 제작사례 (75kVA 평균값)**

| 구 분      | 구매규격    | 제작값  | 기준 대비 | 비 고      |
|----------|---------|------|-------|----------|
| 무부하손(W)  | 180     | 158  | 87.8% | 최소 149W  |
| 부하손(W)   | 972     | 941  | 96.8% | 최소 919W  |
| 효 율(%)   | 98.5    | 98.6 | 99.9% | 최대 98.6% |
| 전압변동율(%) | 1.4     | 1.3  | 92.9% | 최소 1.27% |
| %임피던스(%) | 3.2±10% | 3.12 | 97.5% | 최소 2.88% |

배전선로의 전압변동율 유지기준, 제조업체의 제작기술 수준 등을 고려하여 변압기의 특성값에 대한 개선방안을 모의하기 위하여, 먼저 일반형 주상변압기의 %임피던스를 현행대로 유지하고 효율특성을 개선하기 위하여 무부하손과 부하손을 10% 정도 조정하면 변압기의 특성값은 <표6>과 같다. <표6>에서 효율은 0.14~0.21% 정도 개선되나, 전압변동율은 0.1% 정도로 크게 변동이 없다.

**<표 6> 일반형 주상변압기 특성값 (손실특성 개선)**

| 용 량 (kVA) | 부하손 (W) | 무부하손 (W) | 효 율 (%) | %임피던스 (%) | 전압변동율 (%(역율0.9)) |
|-----------|---------|----------|---------|-----------|------------------|
| 10        | 170     | 32       | 98.0    | 2.8       | 2.56             |
| 20        | 294     | 54       | 98.3    | 2.8       | 2.42             |
| 30        | 392     | 72       | 98.5    | 2.8       | 2.32             |
| 50        | 577     | 108      | 98.6    | 3.2       | 2.41             |
| 75        | 875     | 153      | 98.6    | 3.2       | 2.42             |
| 100       | 1,089   | 188      | 98.7    | 3.2       | 2.36             |

또한, 부하역율 90%에서 전압변동율을 2%이내로 유지하기 위하여 무부하손 및 효율값의 변경없이 %임피던스만 조정하면, 10~30kVA 변압기는 2.8%에서 2.0%로 조정되어야 하고, 50~100kVA 변압기는 3.2%에서 2.3% 수준으로 조정되어야 한다.

그러나, %리액턴스가 10kVA의 경우 2.07%에서 0.65%로, 100kVA의 경우에는 2.96%에서 1.96%로 낮아져야 되므로, 철심의 소요량이 크게 증가되어야 하는 문제점이 있다.

따라서, 손실특성과 %임피던스를 동시에 개선할 경우를 가정하여, 부하손과 무부하손을 각각 10% 정도 감소시키면 효율은 0.14~0.21% 정도 개선되고, 10~30kVA 변압기의 %임피던스를 2.8%에서 2.0%로 조정하고 50~100kVA 변압기는 3.2%에서 2.3% 수준으로 조정하면 전압변동율은 배전계통의 변압기 전압강하 분담기준인 2% 이내로 유지할 수 있다.

**<표 7> 일반형 주상변압기 특성값 개선방안 (손실, %Z)**

| 용 량 (kVA) | 부하손 (W) | 무부하손 (W) | 효 율 (%) | %임피던스 (%) | 전압변동율 (%(역율0.9)) |
|-----------|---------|----------|---------|-----------|------------------|
| 10        | 170     | 32       | 98.0    | 2.0       | 1.99             |
| 20        | 294     | 54       | 98.3    | 2.0       | 1.92             |
| 30        | 392     | 72       | 98.5    | 2.0       | 1.84             |
| 50        | 577     | 108      | 98.6    | 2.3       | 1.91             |
| 75        | 875     | 153      | 98.6    | 2.3       | 1.92             |
| 100       | 1,089   | 188      | 98.7    | 2.3       | 1.87             |

### 4. 결 론

배전용 변압기는 단락과장이 발생하였을 경우 COS 퓨즈 등 보호장치가 동작하기 전까지 정격전류의 최대 40배 단락전류에 의한 과도한 기계적 강도를 견디어야 한다. 이러한 단락강도를 완화시키기 위해서는 %임피던스를 높여야 하나, 배전선로에서 규정한 전압변동율을 유지하기 위해서는 %임피던스의 감소는 불가피하다.

배전용 변압기의 단락강도 개선을 위하여 철심과 권선의 배치방법 변경, 환상도체의 사용, 탭 위치의 재배열, 권선의 바니시 함침, 기계적 지지대의 설치 등 다양한 설계방법이 적용되고 있는데, 특히 바니시 함침은 재료별로 특성이 다양하여 철저한 공정관리가 이루어지지 않을 경우에는 절연내력이 저하되고 절연유의 순환을 저해하여 장기 신뢰성에 상당한 악영향을 미치는 경우가 많으므로, 가급적이면 바니시 함침 공정을 생략하는 제작기법을 개발하여야 한다.

실제 국내 배전용 변압기의 무함침 변압기를 생산하는 한 업체의 하자처리 건수를 살펴보면 개발 초기에는 납품수량 대비 2% 내외의 하자를 처리를 하였으나, 그동안의 지속적인 기술개발의 결과로 0.2% 수준으로 대폭 낮아져 선진 제조업체와 대등한 수준으로 단락강도 특성에 관한 제작기술이 향상되었다.

배전용 변압기의 효율을 0.1% 개선할 경우 2007년도 기준으로 약 140억원의 손실비용을 절감할 수 있으며, 현재 일반용 주상변압기 구매규격의 특성값은 거의 모든 변압기 제조업체에서 제작할 수 있는 수준으로 평준화 되어 있다.

따라서, 지속적인 배전용 변압기의 설계 및 제조기술 개발을 유도하고 전력설비를 효율적으로 운영하기 위하여 변압기의 기술개발 추이에 따라 무부하손, 효율 등의 특성기준을 적기에 개선하고, %임피던스 운영기준을 조정하여 배전선로 전기품질의 가장 중요한 요소인 전압변동율을 개선하는 것이 바람직할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] KSC IEC 60076-5 전력용 변압기 제5부 : 단락강도 시험, 2002
- [2] IEEE std C57.12.00 General Requirements for Liquid-Immersion Distribution, Power and Regulating Transformers, 2006
- [3] 한전표준규격, 변압기 단락강도 시험(ES 5950-0010), 한국전력공사, 1998
- [4] 한전표준규격, 22.9kV 일반형 주상변압기(ES 5950-0016), 한국전력공사, 2007
- [5] 주상변압기 절연과괴 감소대책 연구, 한국전력공사, 1991
- [6] 최신 배전시스템 공학, 대한전기학회, 2006
- [7] 배전기자재 품질향상 Workshop, 한국전력공사, 2007
- [8] 배전용 변압기 품질향상 심포지엄, 한국전력공사, 2006