受變電設備의 에너지節減 對策

受變電設備의 에너지절감 대책으로서는 變壓器의 高效率運轉 力率의 개선, 配電方式의 재검토 등을 생각할 수 있으나 본고(本稿)에서는 變壓器의 특성이나 에너지절감 효과를 기대할 수 있는 變壓器의 효율적인 운전방법, 그리고 역률개선을 위한 기본적인 생각에 대하여 기술하겠다.

1. 變壓器에 있어서의 에너지절감에 대한 고료

受變電設備의 에너지절감 대책을 실시하는 경우에 유효한 방법은 變壓器의 효율적인 운전을 기하는 것이다.

變壓器는 다른 전기기기에 비하면 効率이 높은 기계이며 그 운용에 의한 대폭적인 効率의 향상은 기대할 수 없다.

그러나 가령 아주 적은 効率의 향상이라 할지라도 장기간의 連續運轉의 지속에 의하여 에너지절감 効果는 큰 것이 되는 것이다.

1－1 變壓器의 損失과 効率

變壓器의 損失은 鐵損과 銅損의 둘로 大別 되어진다. 鐵損은 1次卷線의 勵磁에 의하여 생기는 無負荷損이며 負荷의 증감에 관계없이 언제나 一定하다. 한편 銅損은 1次·2次卷線의 抵抗損의 합이며 負荷電流의 2乘에 비례하며 負荷損이라고도 한다. 이와 같은 損失은 出力으로서는 有効하게 利用되지 않고 내부에서 熱로 변환되어 버려 허비되는 電力으로 소비되어 진다. 變壓器의 効率은 이 損失과 出力으로부터 다음 式에 의하여 計算되여진다.

$$効率=\frac{出力(W)}{出力(W)+無負荷損(W)+負荷損(W)}\times 100(\%) \cdots\cdots(1)$$

標準的인 効率은 定格2次電壓, 定格周波數, 定格負荷, 力率 100%에 있어서의 損失을 결정하여 산출한 값으로 표시 되어지며 이것을 規約効率이라고 한다. 變壓器는 負荷의 容量 및 力率이 변화하면 變壓器의 効率도 變化한다.

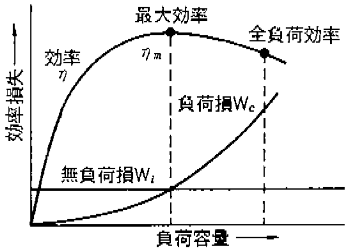
1－2 變壓器의 효율에 영향되는 要因

(1) 負荷容量과의 관계

變壓器의 定格容量을 P(kVA), 負荷率을 x, 負荷의 力率을 Cosθ라고 하면 負荷의 有効分은 $x\cdot$P Cosθ가 된다. 無負荷損 W_i는 變壓器가 勵磁되고 있으면 負荷의 크기에 관계없이 언제나 發生하고 있다. 한편 定格電流時의 負荷損을 W_c라 하면 다른 負荷電流에서는 x의 2乘에 비례하여 $x^2\cdot W_c$가 됨으로 効率 η는

$$\eta=\frac{xP\cos\theta}{xP\cos\theta+W_i+x^2W_c}\times 100$$
$$=\frac{P\cos\theta}{P\cos\theta+\dfrac{W_i}{x}+xW_c}\times 100(\%) \cdots\cdots(2)$$

로 표시된다. 이와 같이 變壓器의 効率은 負荷의



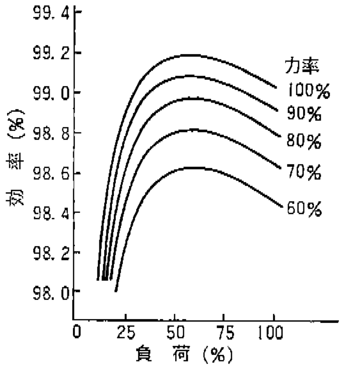
〈그림-1〉 負荷容量과 効率損失의 關係

크기에 따라 變化하며, $(W_i/x+xW_c)$가 最少가 되는 조건 즉 $x=W_i/W_c$때 効率은 最大効率이 된다. 다시 말하면 一定한 電壓 및 負荷力率下에서 最大効率이 되는 것은 無負荷損과 負荷損이 같아지는 負荷容量 때이다. 이 관계를 **그림-1**에 표시한다.

한편 제작되고 있는 變壓器가 최대効率이 되는 負荷容量은 일반적으로 定格容量의 50~60% 負荷가 될 때이다. 따라서 常時, 運轉負荷가 變壓器容量의 約65% 負荷 때이다. 따라서 常時 運轉負荷가 變壓器容量의 約65%가 되면 無負荷損과 負荷損이 같아져서 効率이 最大가 되어 損失이 最少가 된다. 最大効率이 50~65%로 비교적 輕負荷인 것은 變壓器의 鐵心에 사용되고 있는 方向性 硅素鋼板의 특성 향상에 따른 鐵損의 低減, 그리고 製作技術의 改良에 의한 것이다.

(2) 力率과의 관계

一定한 負荷容量 下에서 負荷의 力率이 變化하는 경우, 變壓器의 損失은 변화하지 않음에도 불구하고 2次 端子에서 얻어지는 有効 電力이 변화하기 때문에 力率이 낮아지면 効率도 저하한다. 이것은 식(2)에서도 명백하다. **그림-2**에 力率과 効率의 관계의 일예를 표시한다.



〈그림-2〉 負荷力率에 의한 効率의 變化

2. 變壓器의 効率的인 運轉

2-1 變壓器容量의 검토

變壓器가 상시 最大 効率을 얻을 수 있게 하기 위하여는 負荷容量의 平均値가 變壓器 容量의 50~65%가 되도록 선정하면 된다. 그러나 高効率 運轉만을 고료하여 變壓器 容量을 결정하면 보통의 경우보다 큰 容量을 선정하게 된다.

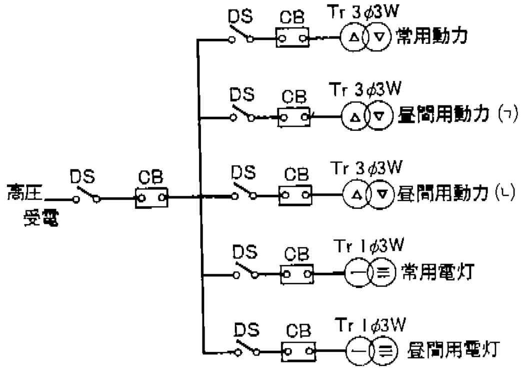
理論上 變壓器 容量의 50~65%의 負荷容量때 最大 効率이 얻어진다는 것은 앞서 記述하였으나 負荷가 40~100%에서도 効率은 거의 변화하지 않는다. 設備 面에서는 80~90% 負荷가 되도록 함이 유리하다. 또 이와 같이 變壓器 容量을 선정하면 變壓器의 과부하 운전의 가능성도 커지지만 어떤 容量 범위내에서의 短時間 過負荷 運轉은 十分 可能하며 반드시 最大効率이 되는 負荷容量을 고집할 必要는 없다.

일반적으로 공장·빌딩·호텔 등에서 變壓器에 걸리는 電氣設備의 負荷는 쉴새 없이 變動하고 있어서 하루종일 一定치 않은 것이 普通이다. 따라서 그때그때의 効率을 생각하여도 무의미한 것이고 하루의 電力量을 基準으로 한 總合 効率로 생각하는 것이 옳다. 다음 式은 全日効率이라고 하여 每日每日의 負荷變動이 같은 뱅크의 경우에 損失 電力量이 最少가 되는 것은 全日効率이 最高가 되기 때문이다.

$$\text{全日効率}=\frac{\text{1日中의出力(kWh)}}{\text{1日中의出力(kWh)}+24\times\text{無負荷損(kWh)}+\text{1日中의無負荷損(kWh)}}\times 100(\%) \quad \cdots\cdots (3)$$

2-2 뱅크(Bank)수의 검토

전술한 바와 같이 無負荷損은 負荷에 관계없이 一定하게 消費되는 損失이기 때문에 輕負荷時에는 이 損失이 큰 比重을 차지하게 되며 에너지節減 대책으로서 무시할 수 없다. 예컨대 야간이나 휴일의

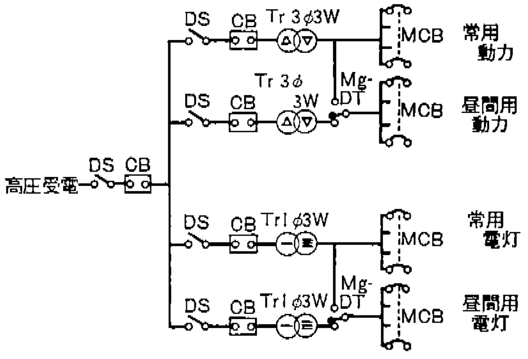


〈그림-3〉 變壓器의 結線方式 (1)

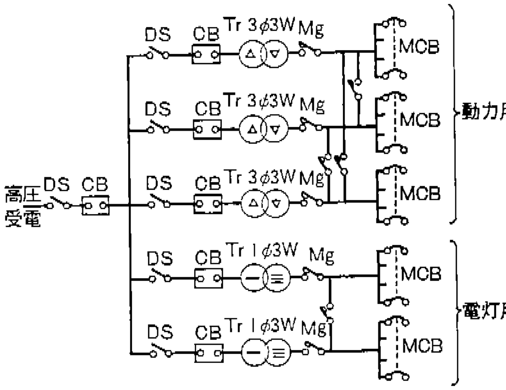
輕負荷時에 있어서는 損失을 적게하기 위하여는 輕負荷變壓器의 停止, 變壓器의 台數 制御, 또는 小容量 變壓器에로의 切換 등의 方法이 있다. 이와같은 運轉을 하기 위하여는 變壓器를 여러 뱅크(Bank)로 하여 系統의 切換이 될 수 있는 設備로 할 必要가 있다.

變壓器의 效率이라는 點에서 생각하면 變壓器를 여러 뱅크로 나누는 것은 單器容量을 적게하는 것이기 때문에 效率의 低下를 가져 오는 것이 되므로 뱅크數는 될 수 있는대로 적게하고 單器容量을 크게 하는 것이 바람직하다.

그러나 계절이나 夜間時 등 定期的으로 休止되는 負荷가 있어서 그때의 負荷가 變壓器 容量의 40% 以下가 될 수 있는 경우에는 오히려 效率의 低下가 되어지기 때문에 負荷의 低減率 및 休止期間 등을 고려하여 多뱅크 系統으로 하여 高效率의 운전이 되도록 검토할 필요가 있다.



〈그림-4〉 變壓器의 結線方式 (2)



〈그림-5〉 變壓器의 結線方式 (3)

그림-3, 그림-4, 그림-5에는 變壓器의 결선方法의 예를 표시한다. **그림-3**은 사용시간 대별(使用時間帶別)로 각각의 變壓器를 설치하여 使用時間 外의 變壓器를 분리시키고 無負荷損을 적게하는 方式으로 2단계~3단계의 단순한 變壓器制御로 損失을 줄일 수 있다.

그림-4는 電燈·動力用 다같이 大小容量 2台의 變壓器를 設置하여 重負荷時와 輕負荷로 나누어서 變壓器를 선택하여 無負荷損을 적게하는 方式으로 變壓器의 2次側을 電磁接触器(Magnetic Switch(Mg))로 切換하는 2段階의 變壓器制御이다.

그림-5는 전등·동력의 각 負荷에 2台 以上의 變壓器를 설치하여 負荷의 變動에 맞추어 가장 效率이 좋은 變壓器의 組合을 선택하여 남은 變壓器를 回路에서 분리시키는 方式이다. 이 方式은 變壓器의 2次側에서 어떤 變壓器와도 組合할 수 있으므로 電氣供給 面에서 融通性이 있으며 사용부하에 대하여 特히 制約하지 않고 運轉할 수 있는 制御方式이다.

한편 이 方式은 普通의 경우와 비교하여 變壓器의 單器容量을 相當히 적게하고 여러 뱅크로 하고 있어서 無負荷損의 總損失은 大容量器 1台의 경우보다 커질 가능성이 있다. 이 때문에 2台 以上의 變壓器를 설치하여 高效率 운전을 꾀하는 경우 1日 24時間에 發生하는 無負荷損이 가장 작게 될 수 있도록 變壓器容量과 뱅크數를 決定할 必要가 있다. 또 變壓器 2次側의 回路構成이 복잡하게 되어 조작상 주의를 요하는 외에 初期投資額도 커진다.

3. 高効率機器의 선정

變壓器는 受變電設備를 구성하는 各種 電氣機器中에서는 損失에너지가 相當히 큰 것이다. 따라서 發生損失이 적은 機種을 使用하는 것이 有効한 에너지절감 대책이라고 할 수 있다.

變壓器에는 油入變壓器, H種乾式變壓器, 몰드(Mold)變壓器(사진-1 참조)가 있으나 그 중에서도 몰드變壓器는 특성, 성능이 優秀하여 에너지節減 時代의 要求에 一致하는 變壓器이다.

이 몰드變壓器는 에폭씨몰드(Epoxy mold)의 우수한 절연성능(空氣의 절연내력의 약10배)을 살려서 합리적인 巻線絶縁構成으로서 몰드巻線을 보다 조밀하게 제작하고 있기 때문에 鐵心, 巻線 部分에 發生하는 損失이 적은 機器로 되고 있다.

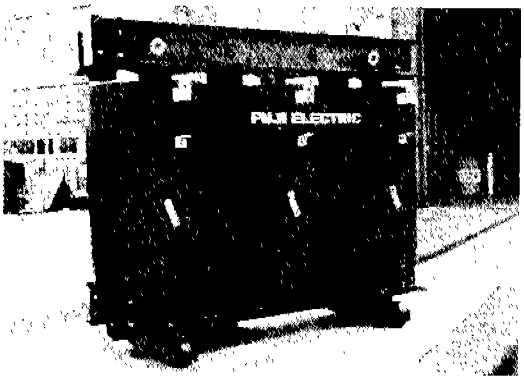
종래부터 사용 되어온 바니스含浸型 H種乾式 變壓器보다 약40%, 油入變壓器보다 약30%, 發生損失이 적은 것으로 되여 있다.

3相 6kV 약500kVA 變壓器의 운전의 예에서 試

〈표-1〉 變壓器損失에 의한 電力消費量(kWH)의 비교

〔3相50Hz, 6kV 또는 3kV, 500kVA의 예〕

하루의 運転条件	몰-드 変圧器	H種乾式 変圧器	油入変圧器
24時間100%負荷	1.0 (基準)	1.703	1.484
12時間 80%負荷+12時間 50%負荷	0.61	0.94	0.816
12時間100%負荷+12時間無励磁	0.5	0.852	0.742
12時間 80%負荷+12時間無励磁	0.374	0.604	0.525



〈사진-1〉 몰드 變壓器

〈표-2〉 電力消費量의 低減에 의한 運轉經費의 節減額

〔3相 50Hz, 6kV 또는 3kV, 500kVA의 예〕

1日을 基準한 때의 運轉 條件	H種 乾式에 대한 富士電力用 몰드變壓器의 低減	油入에 대한 富士製電力用 몰드變壓器의 低減
24時間 100% 負荷	1,744 萬원	1,200 萬원
12時間 80% 負荷 +12時間 50%負荷	821 〃	511 〃
12時間 100% 負荷 +12時間 無勵磁	872 〃	. 600 〃
12時間 80% 負荷 +12時間 無勵磁	571 〃	376 〃

註 1) 10年間 운전한 경우를 표시한다.

2) 전력요금은 ₩44/kWH로 가정하였다.

譯者注: 전력 요금은 원貨 對 日本엔貨의 外換基準率을 基準하여 原本의 것을 換算한 것이다. 國内 電力料金과 비교적 근사하다.

算하면 10年間의 운전에서 變壓器 損失에 의한 電力料金의 節減分은 H種乾式 變壓器에 비교하여 약 1,263萬원, 油入變壓器와 比較하여 약947萬원이라는 큰 값이 된다. 표-1에 各種의 負荷形態에서의 變壓器 發生 損失의 비교를 표시하였고 표-2에는 이와같은 각 부하 형태에서 10年間 운전하였을 때 몰드變壓器 운전에 의한 운전경비의 절감효과를 표시한 것이다.

4. 力率改善

電力負荷 중에서 電動機, 誘導爐, 용접기 등의 電氣機器는 有効電力外로 상당량의 無効電力을 소비하기 때문에 이와 같은 機器가 접속되어 있는 電氣系統에서는 回路力率이 나빠지고 있다.

따라서 이와 같은 系統에서는 電源에서 供給되는 電流가 커진다.

이에 따라서 電力損失의 増大, 電壓降下의 増大, 또는 回路電氣機器의 定格電流의 容量増加, 더군다나 電氣料金의 증가 등의 不利益이 발생한다.

이와 같이 系統에 電力用 콘덴서를 시설하면 回路 力率을 향상시켜 無効電力의 억제가 가능하여 전술한 피해를 방지할 수 있다.

4 - 1 콘덴서容量의 算出法

負荷容量 W(kW)의 力率 conθ_0를 콘덴서의 설치에 의하여 cosθ_1으로 개선하기 위하여 필요한 容量 Q_c(kVA)는 다음과 같이하여 求하여 진다 (**그림 - 6** 참조).

$$Q_c = W(\tan\theta_0 - \tan\theta_1)$$

$$= W\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_1} - 1}\right) \cdots\cdots\cdots(4)$$

$$\therefore \frac{Q_c}{W} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_1} - 1} \cdots\cdots\cdots(5)$$

또, $W = P\cos\theta_0$에서

$$\frac{Q_c}{P}\cos\theta_0\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_0} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta_1} - 1}\right) \cdots(6)$$

上式을 圖示한 것이 **그림 - 7** (a) 및 (b)이다. 전자는 개선을 요하는 콘덴서 容量을 kW負荷의 百分率로 표시한 것이고, 후자는 kVA의 百分率을 구하는 데에 편리한 그래프이다. 지금 부하용량 500kW의 力率 75%를 90%로 개선 하는데에 필요한 콘덴서 容量을 구하면 上式에서도 계산되지만 **그림 - 7**에서 進相 前의 力率 75%의 横軸이 개선力率 90%의 곡선과 마주치는 點의 横軸分을 求하면 40%가 되여 소요 콘덴서 容量은

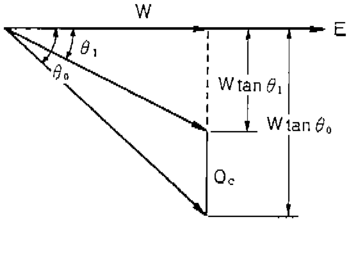
$$Q_c = 500(\text{kW}) \times 0.4 = 200(\text{kVA})$$

가 되여 200kVA의 콘덴서를 설치하면 된다.

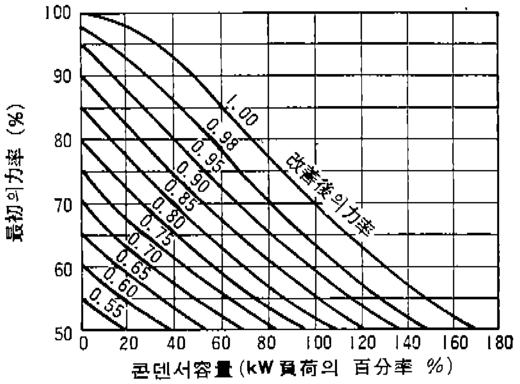
4 - 2 力率改善에 의한 效果

- 電力損失의 輕減

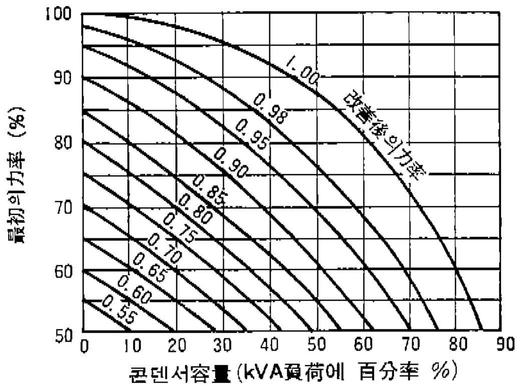
(ㄱ) 線路損失의 低減



〈그림 - 6〉 콘덴서容量決定을 위한 벡터圖



(a) kW負荷를 기준으로한 경우



(b) kVA負荷를 기준으로한 경우

〈그림 - 7〉 콘덴서의 容量과 改善後의 力率關係

電力損失은 I^2R로 표시되여 有效電力을 一定으로 한 경우 損失輕減率 α는 다음 式으로 주어진다

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right)^2 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

(ㄴ) 變壓器損失(銅損)의 低減

力率 改善에 의하여 銅鐵이 低減되지만 이 低減이 될 수 있는 電力損失 ∠(kW)는 다음 式에서 求할 수 있다.

$$L = \left(\frac{100}{\eta} - 1\right)\frac{2}{3} \cdot T\left(\frac{W}{T}\right)^2\left(1 - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos^2\theta_1}\right) \cdots\cdots(8)$$

η : 変圧器의効率

T : 変圧器의定格容量 (kVA)

W : 変圧器의運転容量 (kVA)