

變壓器의 適正容量을 알아본다

變壓器容量이 負荷容量에 대해 適正하지 못하면 다음과 같은 장애가 생긴다.

(1) 「過小容量」일 때 : 변압기 용량이 부하의 최대전력에 비해 너무 작으면 변압기를 過負荷運轉하게 되고 이것이 높아지면 壽命短縮을 초래하는 결과가 된다. 또 負荷損의 증대에 따라 효율이 低下한다.

(2) 「過大容量」일 때 : 변압기 용량이 너무 크면 수명의 점에서는 문제가 없지만 ① 設備費用의 증가, ② 계약전력 증대, ③ 無負荷 손실의 증대 등 직접적인 금전 부담으로 연결된다.

따라서 변압기 용량을 適正化함으로써 信賴性 있는 변압기의 운전과 운용비의 節減을 도모할 수 있다.

1. 變壓器容量과 損失

變압기의 定格容量이란 定格 2 次電壓, 定格周波數 및 定格力率에 있어서 지정된 온도상승 한도를 초과하지 않고 2 차 단자간에 얻어지는 皮相電力을 킬로 볼트 암페어 (kVA) 또는 메가 볼

트 암페어 (MVA)로 표시한 것이다. 변압기의 용량을 선정하는 경우는 표준용량이 권장되고 있으며 표 1, 표 2에서 선정하는 것이 유리하다.

變압기에서 발생하는 주요 손실에는 無負荷損과 負荷損이 있다.

무부하손은 鐵損, 勵磁電流에 의한 저항손과 절연물에 전압이 가해짐으로써 생기는 誘電體損의 합이다. 이중 저항손과 유전체손은 극히 작기 때문에 보통 무시해도 지장이 없고 무부하손 = 철손이 된다. 無負荷損은 변압기 용량이 커질수록 증가하고 또 過勵磁狀態가 되면 비약적으로 증가한다. 예를 들면 변압기가 5%의 과여자로 운전되면 무부하손은 정격전압에서의 운전시에 비해 약 20% 증가한다.

負荷損에는 부하전류에 의해 捲線에 발생하는 저항손, 漏洩磁束에 의해 捲線 내에 생기는 渦電流損과 捲線 이외의 금속부에 생기는 漂遊損이 있다. 부하손은 부하전류의 제곱에 비례해서 변화하므로 정격용량에 대해 50% 부하로 운전하고 있는 변압기의 負荷損은 정격부하시의 25%가 된다. 반대로 20% 과부하 상태에서는 약

(표 1) 單相變壓器의 標準容量(kVA)

	(15)	150	1,500	15,000
	20	200	2,000	20,000
(3)	30	300	3,000	30,000
5	50	500	5,000	50,000
(7.5)	75	750	7,500	
10	100	1,000	10,000	

() 內準標準

(표 2) 三相變壓器의 標準容量 [kVA]

	(15)	150	1,500	15,000	150,000
	20	200	2,000	20,000	200,000
					250,000
(3)	30	300	3,000	30,000	300,000
			4,500	45,000	400,000
5	50	500		50,000	450,000
			6,000	60,000	
(7.5)	75	750	7,500		
10	100	1,000	10,000	100,000	

() 內準標準

44%나 증가하게 되고 負荷損만을 생각하면 輕負荷 운전을 함으로써 發生 손실을 대폭 감소시킬 수 있다.

2. 損失과 變壓器의 適正容量

가. 日負荷曲線

變壓器의 용량을 검토하기 위해서는 부하 데이터의 수집이 不可缺하다. 그 수단으로 부하의 시간적인 변동상태를 나타내는 負荷曲線의 작성을 들 수 있다.

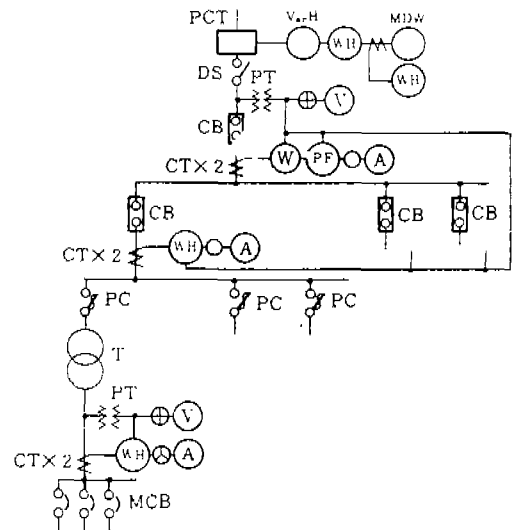
부하곡선은 가로축에 시간을 잡고 세로축에 1시간 마다의 소비전력량을 기록한 日負荷曲線

이 사용되는데, 이 밖에 週間, 月間 또는 年間을 통한 부하곡선이 사용되는 일도 있다.

日負荷曲線은 당연히 日의 변동이 있고 平日과 休일이 크게 다르며, 또 계절에 따라서 변화한다. 그러나 동일 시기의 平日에 있어서는 거의 동일한 패턴이 되며 동일 업종에 있어서도 유사한 패턴이 된다. 그림 1은 고압수변전설비에서의 計測例를 표시한 것으로서, 變壓기 회로에서는 變壓기 운전의 監視目的을 위해서는 電流計가 적합하고 日負荷曲線 작성에는 전력량 측정 데이터가 사용된다.

나. 變壓器容量의 검토

그림 2의 3종류의 日負荷曲線에 대해 損失面에서 본 變壓기의 적정용량을 생각해 본다. 그림 (a)는 夜間에 保安電力만을 사용하는 業種에 많은 패턴으로, 機械工業, 製造業 등에 볼 수 있는 부하곡선이다. 그림 (c)는 24시간 조업으로 낮, 밤의 부하변동이 적은 업종에 많고 鐵鋼業, 化學工業 등에 볼 수 있는 부하곡선이다. 그



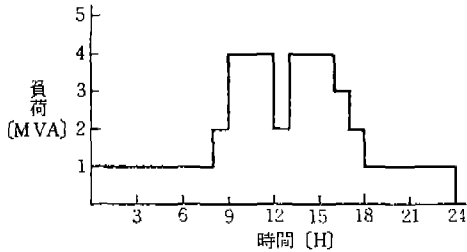
(그림 1) 高壓受變電設備의 計測例

림 (b)는 (a), (c)의 중간으로 想定한 부하곡선이다.

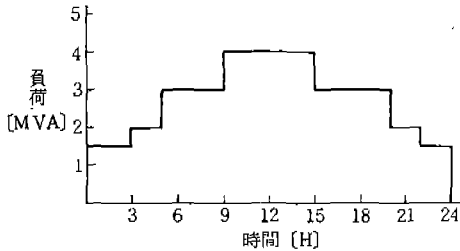
변압기의 電力量 효율을 나타내는 것으로서 全日效率이 있다. 전일효율이란 변압기의 1日 出力電力量과 1日 출력 전력량에 全損失 電力量을 더한 것과의 비율을 말한다.

$$\text{全日效率} = \frac{\text{1日的 全出力電力量}}{\text{1日的 全出力電力量} + \text{1日的 全損失電力量}} \times 100 [\%]$$

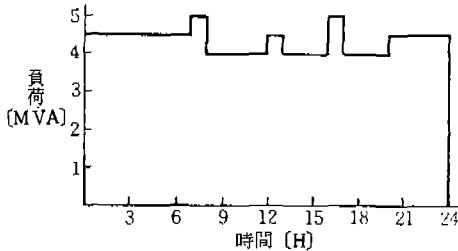
各 負荷 패턴에 대해 5MVA와 7.5MVA의 변압기를 적용한 경우의 全日效率과 損失을 비



(a) 負荷 패턴 (I)



(b) 負荷 패턴 (II)



(c) 負荷 패턴 (III)

〈그림 2〉 日負荷曲線

교해 본다. 변압기의 손실은 표 3 60kV 油入變壓器 特性표를 사용하는 것으로 한다.

〈패턴 (I)의 負荷曲線 計算〉

(i) 5MVA 적용의 경우

1 日의 出力電力量

$$1 \times 14 + 2 \times 3 + 3 + 4 \times 6 = 47,000 [\text{kWh}]$$

$$\text{평균전력} = \frac{47,000}{24} = 1,958 [\text{kW}]$$

1 日의 無負荷損 $10.8 \times 24 = 259.2 [\text{kWh}]$

1 日의 負荷損

$$43.3 \times \{ (1/5)^2 \times 14 + (2/5)^2 \times 3 + (3/5)^2 + (4/5)^2 \times 6 \} = 226.9 [\text{kWh}]$$

따라서

$$\text{全日效率} = \frac{47,000}{47,000 + 259.2 + 226.9} \times 100 = 98.98 [\%]$$

變壓器의 平均 부하율은

$$\frac{1,958}{5,000} \times 100 = 39.2 [\%]$$

(ii) 7.5MVA 適用의 경우

1 日의 無負荷損 $14.1 \times 24 = 338.4 [\text{kWh}]$

1 日의 負荷損

$$56.3 \times \{ (1/7.5)^2 \times 14 + (2/7.5)^2 \times 3 + (3/7.5)^2 + (4/7.5)^2 \times 6 \}$$

〈표 3〉 60kV 油入變壓器 特性表

容量 (kVA)	無負荷損 (kW)	負荷損 (kW)	全損失 (kW)	效率 (%)
2,500	6.5	27.5	34.0	98.66
3,000	7.6	30.4	38.0	98.75
5,000	10.8	43.3	54.1	98.93
7,500	14.1	56.3	70.4	99.07
10,000	17.0	67.8	84.8	99.16
15,000	23.9	95.6	119.5	99.21
20,000	28.6	114.4	143.0	99.29

$$= 131.1 \text{ [kWh]}$$

따라서

$$\begin{aligned} \text{全日效率} &= \frac{47,000}{47,000 + 338.4 + 131.1} \times 100 \\ &= 99.01 [\%] \end{aligned}$$

변압기의 평균 부하율은

$$\frac{1,958}{7,500} \times 100 = 26.1 [\%]$$

패턴 (II), (III)의 부하곡선에 대해서도 동일하게 구해서 이들 수치를 종합한 것이 표 4이다.

이 표에 의해 평균 부하율의 차이가 적은 (39.2 - 26.1 = 13.1%) 패턴 (I)의 경우에는 5MVA 또는 7.5MVA를 사용했을 때의 손실은 大差없고 7.5MVA를 사용해도 운전 손실상 이득은 없다. 한편 平均負荷率의 차이가 큰 (86.7 - 57.8 = 28.9%) 패턴 (III)일 때는 확실히 7.5MVA 쪽이 損失 이득이 있다.

또 패턴 (III)과 같이 부하변동이 적은 경우는 平均負荷率이 변압기의 최고효율이 되는 용량을 선정하면 되지만 부하변동이 큰 경우는 그 밖에 並列運轉이나 過負荷運轉을 고려해서 용량을 선정하면 이득이 되는 경우가 있다.

다. 設置臺數의 검토

그림 2의 부하 패턴 (I)에서 변압기 구성을

〈표 4〉 各負荷 패턴의 全日效率과 損失의 比較

패턴	項 目		出力電力量 ($\cos\phi = 1.0$) [kWh]	全日效率 [%]	1일의 損失量 [kWh]
	變壓器 容量	平均 負荷率 [%]			
I	5MVA	39.2	47,000	98.98	486.1
	7.5MVA	26.1		99.01	469.5
II	5MVA	55.4	65,500	99.09	613.0
	7.5MVA	36.9		99.24	506.8
III	5MVA	86.7	104,000	99.01	1,043.8
	7.5MVA	57.8		99.24	791.5

5MVA 1대일 때와 2.5MVA 2대일 때에 대해 損失面에서 어느 쪽이 有利한가를 계산해 본다.

(i) 5MVA 1대인 경우

표 4에 의해

1일의 全損失 486.1 [kWh]

全日效率 98.98 [%]

(ii) 常時 2대 운전

1 日의 無負荷損 $6.5 \times 24 \times 2 = 312$ [kWh]

1 日의 負荷損

$$\begin{aligned} &27.5 \times 2 \times \{ (1/5)^2 \times 14 + (2/5)^2 \\ &\quad \times 3 + (3/5)^2 + (4/5)^2 \times 6 \} \\ &= 288.2 \text{ [kWh]} \end{aligned}$$

1 日의 全損失 $312 + 288.2 = 600.2$ [kWh]

全日效率 98.74 [%]

(b) 運轉制御

먼저 어떠한 負荷狀態에서 2대를 1대로 전환하는 쪽이 損失이 적어지는가를 생각해 보면 1대 운전시의 손실 W_1 은

$$W_1 = P_F + \left(\frac{Q_L}{Q_T} \right)^2 \times P_C \text{ [kW]}$$

P_F : 無負荷損, P_C : 負荷損

Q_T : 1臺의 變壓器容量, Q_L : 負荷容量

2臺 運轉時는

$$W_2 = 2 \left\{ P_F + \left(\frac{Q_L}{2Q_T} \right)^2 \times P_C \right\} \text{ [kW]}$$

가 되고 1대 운전쪽의 損失이 적어지는 조건은

$$P_F + \left(\frac{Q_L}{Q_T} \right)^2 P_C < 2 \left\{ P_F + \left(\frac{Q_L}{2Q_T} \right)^2 P_C \right\}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{Q_L}{Q_T} \right)^2 P_C < P_F$$

$$\frac{P_C}{P_F} = \alpha < \frac{2Q_T^2}{Q_L^2} \quad (\alpha: \text{損失比})$$

$$\therefore Q_L < \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot Q_T$$

가 된다.

이 式을 사용해서

$$Q_L < \sqrt{\frac{2}{4.23}} \times 2,500 = 1,719$$

즉, 負荷容量이 1,719kVA 이하인 경우는 1 대 운전쪽이 손실이 적어진다.

다음에 2.5MVA 1대로 14h, 2.5MVA 2대로 10h 운전한 후 손실과 全日效率를 구하면

1 日의 無負荷損

$$6.5 \times (14 + 2 \times 10) = 221 \text{ [kWh]}$$

1 日의 負荷損

$$27.5 \times \{ (1/2.5)^2 \times 14 + 2 \times (2/5)^2 \times 3 + 2 \times (3/5)^2 + 2 \times (4/5)^2 \times 6 \} = 319 \text{ [kWh]}$$

1 日의 全損失 221+319=540 [kWh]

全日效率 98.86 [%]

표 5의 全日效率를 비교해도 명확하듯이 변압기를 여러 대로 하는 것보다도 1대로 운전하는 쪽이 손실이 적어진다. 그러나 損失面 이외에 대해서 보면 單器容量이 커지면 2차전류가 커지고 차단용량이 증대하는 것이나 변압기의 보수·점검시의 停電問題 등이 생긴다. 또 수송이나 반입조건의 치수 상의 제한 때문에 부득이 여러 대로 하는 일도 있다.

3. 過負荷 運轉

變壓器는 특정조건 하에서는 負荷가 변압기의 定格容量을 초과하여도 수명을 저하시키는 일없이 운전할 수가 있다. 따라서 단시간의 피크 負荷 때문에 변압기 용량을 크게 할 필요는 없고 과부하 운전을 고려한 용량의 선정은 효과적이다.

가. 變壓器의 壽命

變壓器의 수명이란 損失에 의한 發熱, 濕度와 酸素로 인해 절연물의 劣化가 진행된 상태에서 外雷, 內雷 등의 異常 電壓이나 전기적 기계적

〈표 5〉 變壓器의 設置대수와 損失
(그림 2의 패턴 (i)인 경우)

	2,500kVA 2대	5,000kVA 1대	
變壓器 대수와 運轉時間[h]	2대×24	1대×14 2대×10	1대×24
平均負荷率[%]	39.2	55.3	39.2
1 日의 損失量[kWh]	600.2	540	486.1
全日效率[%]	98.74	98.86	98.98

인 스트레스를 받은 경우에 絶緣이 파괴될 危險度가 상당히 높아진 시점이다. 이 수명에 가장 큰 영향을 미치는 것은 절연물의 最高點 溫度이고 절연물의 최고점 온도는 다음 식으로 부여된다.

절연물의 최고점 온도

$$= \text{냉각매체 온도} + \text{권선 평균온도 상승}$$

$$+ \text{권선 최고점 온도와 평균온도의 관계}$$

JEC-204(일본전기학회규정)의 온도 상승에 관한 규정에서는 주위온도가 25℃로 일정하고 정격부하로 연속 사용하여 최고점 온도가 95℃인 경우에 變壓器는 30년 정도의 수명을 기대할 수 있다고 하고 있다.

나. 油入變壓器의 過負荷運轉

유입변압기의 과부하 운전방법에 대해서는 일본전기학회 기술보고 「유입변압기 운전지침」에 상세히 나와 있는데, 여기서는 正規壽命을 기대할 수 있는 과부하 운전에 대해 概略을 소개한다.

(1) 過負荷運轉에 있어서의 주의사항 과부하 운전을 하는데 있어서는 捲線과 기름의 온도 이외에 過負荷를 제한하는 것으로서 다음과 같은 사항을 생각할 수 있다. 경우에 따라서는 이러한 制限 때문에 許容限度까지 負荷할 수 없을 때도

있으므로 사전에 충분히 검토해 두어야 한다.

(i) 부상, 탭 전환기의 電流容量과 부하시 탭 전환기의 전환 능력

(ii) 변압기 회로에 포함되는 케이블, 리액터, 차단기, 단로기, 변류기 등의 電流容量

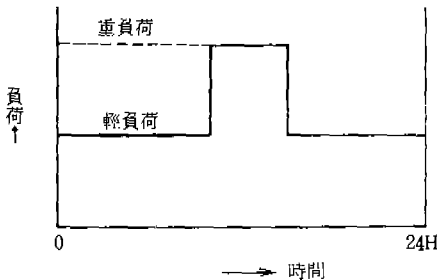
(iii) 繼電器 整定과 전류계의 지시범위 適否

(iv) 옥내설비인 경우의 過負荷에 의한 주위 온도의上昇

(2) 周圍溫度와 부하변동에 대응하는 허용부하 주위온도가 25℃와 相異なる 경우 및 負荷가 변동하는 경우의 許容負荷를 표 6~8에 든다. 이들 表는 그림 3에서 표시하는 바와 같이 변압기에는 상시 輕負荷가 걸려 있을 때 1日 1回 一定한 과부하를 어느 정도 걸 수 있는가를 표시한 것이며 過負荷가 1日 2回 이상 가해지는 경우는 그 合計 負荷時間과 같은 시간만 과부하가 1日 1回 가해지는 것으로 하여 이들 表를 사용하면 좋다.

또한 표 중의 等價周圍溫度는 실제의 주위 온도는 계절 변동과 주야의 변화가 있어 일정하지 않지만 이것을 수명 손실에서 보아 等價인 一定溫度로 환산한 것이고 近似的으로는 연간 평균 온도에 5℃를 가해두면 安全 사이드가 된다.

(3) 溫度試驗記錄에 입각한 許容負荷 온도시험에 의한 捲線의 온도상승 값이 규정 한도보다 5



〈그림 3〉 假定負荷 周期

deg 이상 낮은 경우에는 그 差가 5 deg를 넘는 1 deg마다 1%를 표 6~8에 加算해도 된다.

예를 들면 捲線 平均溫度 上昇値가 45deg였을 때는 규정 상승한도를 55deg로 하면

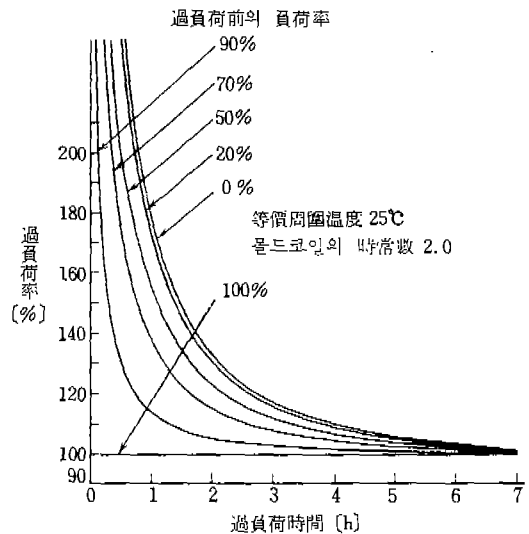
$$1.0 \times (55 - 5 - 45) = 5 [\%]$$

만큼 加算한 수치까지 過負荷가 가능해진다.

(4) 冷却器 추가에 따른 과부하 운전 油入自冷式 變壓器의 경우에는 냉각 팬의 장착이나 냉각기를 추가함으로써 容量의 증가가 가능하다. 일반적으로 용량 증가율은 20~25%가 되지만 前述한 바와 같이 부상이나 탭 전환기의 電流容量을 체크해야 하고, 改造時에는 메이커에 문의하는 것이 좋다.

다. 乾式變壓器의 과부하 운전

乾式變壓器에 대해서는 현재로는 유입변압기처럼 統 一된 指針이 없다. 이것은 ①유입변압기에 비해 절연물의 종류가 극히 많아 溫度에 대한 절연물의 劣化特性을 일률적으로 정할 수 없



〈그림 4〉 B種 몰드 變壓器의 短時間 許容過負荷

〈표 6〉 油自然循環方式으로 時定數 1.5時間인 경우의 許容負荷(定格負荷에 대한 百分率)

重負荷以外의 輕負荷(定格 負荷에 대한 百分率)	50 [%]												70 [%]					90 [%]					100 [%]				
	等價周圍溫度 [°C]		0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50				
	重 負 荷 時 間 (h)		0.5	150	150	150	150	148	132	150	150	150	150	150	150	136	100	150	150	146	132	100	150	141	100		
	1.0		150	150	150	144	131	116	150	150	150	144	137	121	89	150	150	141	132	120	100	150	149	100			
	2.0		150	148	137	132	127	115	101	150	145	134	128	122	108	81	150	140	128	120	110	100	148	137	100		
	4.0		142	133	123	118	113	102	89	141	131	121	116	110	97	76	139	129	118	111	102	100	137	127	100		
	8.0		132	123	113	108	103	92	80	131	122	113	107	102	90	74	131	121	111	105	98	100	130	120	100		
	24.0		123	114	104	100	94	84	72	123	114	104	100	94	84	72	123	114	104	100	94	100	123	114	100		

〈표 7〉 油自然循環方式으로 時定數 2.5時間인 경우의 許容負荷(定格負荷에 대한 百分率)

重負荷以外의 輕負荷(定格 負荷에 대한 百分率)	50 [%]												70 [%]					90 [%]					100 [%]				
	等價周圍溫度 [°C]		0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50				
	重 負 荷 時 間 (h)		0.5	150	150	150	150	150	136	150	150	150	150	150	139	102	150	150	149	134	100	150	150	144	100		
	1.0		150	150	150	150	137	121	150	150	150	143	126	91	150	150	145	136	122	100	150	150	132	100			
	2.0		150	150	146	140	134	121	106	150	150	141	134	128	112	82	150	146	132	123	111	100	150	141	100		
	4.0		149	139	129	123	118	106	92	146	136	126	120	114	100	77	143	133	120	113	103	100	141	129	113	100	
	8.0		135	126	116	111	106	94	81	134	125	115	109	104	91	74	133	123	112	106	98	100	132	121	108	100	
	24.0		123	114	104	100	94	84	72	123	114	104	100	94	84	72	123	114	104	100	94	100	123	114	104	100	

〈표 8〉 油自然循環方式으로 時定數 3.5時間인 경우의 許容負荷(定格負荷에 대한 百分率)

重負荷以外의 輕負荷(定格 負荷에 대한 百分率)	50 [%]												70 [%]					90 [%]					100 [%]				
	等價周圍溫度 [°C]		0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50	0	10	20	25	30	40	50				
	重 負 荷 時 間 (h)		0.5	150	150	150	150	150	138	150	150	150	150	150	141	102	150	150	150	150	135	100	150	145	100		
	1.0		150	150	150	150	141	124	150	150	150	146	128	91	150	150	148	138	124	100	150	150	133	100			
	2.0		150	150	150	145	139	125	109	150	150	145	138	131	114	83	150	149	135	125	113	100	150	143	122	100	
	4.0		150	144	134	128	122	109	94	150	141	129	123	117	102	77	147	135	122	114	104	100	144	131	114	100	
	8.0		139	129	119	114	108	96	83	137	127	117	111	105	92	74	135	125	113	106	99	100	133	122	109	100	
	24.0		123	114	104	100	94	84	72	123	114	104	100	94	84	72	122	114	104	100	94	100	123	114	104	100	

〈표 9〉 低損失形變壓器의 特性(50Hz) (日本의 例)

相數	容 量 [kVA]	全損失 [W]	無負荷損 [W]	負荷損 [W]	損失比	全負荷時의 效 率 [%]	最高效率 [%]	最高效率이 되는負荷率 [%]
單相	150	2,750	450	2,300	5.1	98.2	99.40	44.2
	200	3,460	540	2,920	5.4	98.3	99.46	43.0
	300	4,880	720	4,160	5.8	98.4	99.52	41.6
三相	20	597	170	427	2.5	97.1	98.32	63.0
	30	833	220	613	2.8	97.3	98.55	59.9
	50	1,282	310	972	3.1	97.5	98.77	56.5
	75	1,766	380	1,386	3.6	97.7	98.99	52.2
	100	2,250	460	1,790	3.9	97.8	99.08	50.7
	150	3,220	590	2,630	4.4	97.9	99.22	47.3
	200	4,080	710	3,370	4.7	98.0	99.23	45.9
	300	5,810	920	4,890	5.3	98.1	99.39	43.3
500	8,650	1,280	7,370	5.7	98.3	99.49	41.6	

註：JEM 1392의 一部와 推定值

으며, ② 乾式變壓器의 과부하는 설치장소의 습기, 환경, 먼지, 주위온도 등의 조건에 영향받아 이런 條件을 표준적으로 설정하는 것은 어렵기 때문이다.

여기서는 참고로, B種 볼드 변압기를 예로 들어 許容 過負荷曲線을 그림 4에 든다.

이 曲線의 算定基準은 다음과 같다.

- (i) 捲線의 최고점 온도상승은 90℃ 이하로 한다.
- (ii) 等價 周圍溫度는 25℃로 하고 주위 온도의 최고값은 40℃로 한다.
- (iii) 捲線의 溫度上昇 時定數는 2시간으로 한다.
- (iv) 捲線의 온도상승은 부하전류의 1.6 곱에 비례하는 것으로 한다.

4. 低損失形 變壓器

變압기 용량을 適正化함으로써 電力使用의 습

理化가 도모되지만 다시 더 損失이 적은 변압기를 사용함으로써 러닝 코스트의 低減이 도모된다. 저손실형 변압기의 一례로서 JEM 1392를 적용한 배전용 6kV 저손실형, 유입변압기가 있다. 이 규격에는 效率, 電壓變壓率, 무부하 전류, 무부하손이 규정되어 있는데, 이것에 입각해서 負荷損, 全損失, 損失比, 최고효율, 최고효율이 되는 負荷率을 계산하여 종합한 것이 표 9이다.

이 變壓器는 鐵心에 특성이 우수한 方向性 硅素鋼帶를 사용해서 無負荷損을 60~70%로 低減시킨 것인데, 이에 의해 負荷損을 포함한 변압기의 效率도 0.1~0.4% 향상하여 전력절약의 효과가 큰 것이 되었다.

無負荷損에 주목하면 어모퍼스 磁性材料를 鐵心에 사용한 어모퍼스 변압기가 있다. 어모퍼스 변압기의 무부하손은 현행의 硅素鋼板 變壓器의 1/3~1/4이 되기 때문에 實用化되면 대단한 전력절약 효과가 기대된다.