

変圧器利用率に関する OR 的考察

島 輝夫* 高橋充夫** 森 八郎***

は し が き

電力設備資産の重要な部門を占める変圧器の負荷管理ならびにその運用ないしは投資方法について長年検討が加えられて来たが、本報告では、中間変電所、配電用変電所変圧器および低圧配電線を含めた柱上変圧器運用について、OR 的な新しい見地に立って考察を加えたのでその概要を紹介する。

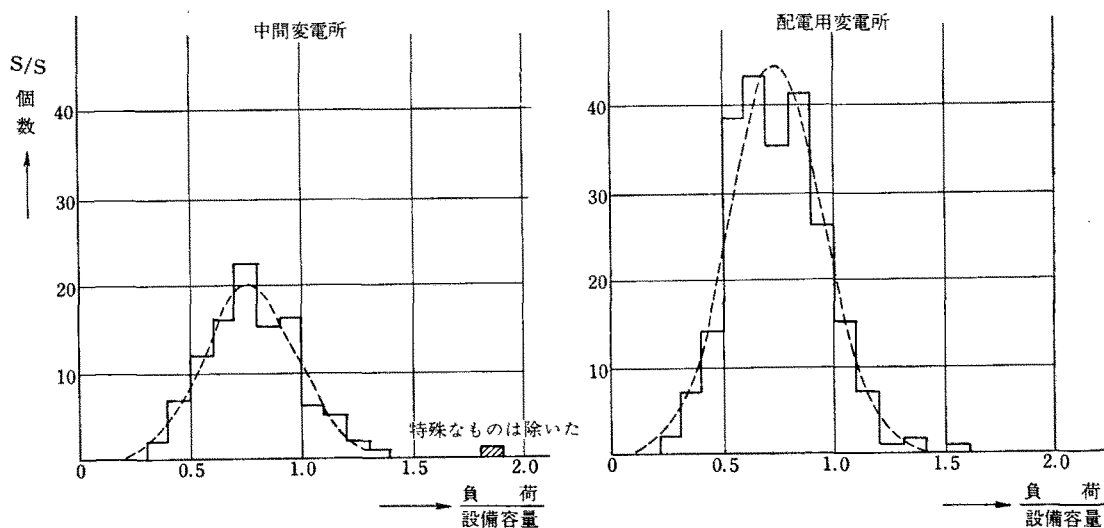
ここに述べる変圧器の経済的な利用方法については電力設備全体からみた場合必ずしも総合的な経済性に一致するものでないが、ここでは変圧器だけに問題を限って、その考え方を述べることにする。

1. 変圧器利用率に関する統計的考察

1.1 変圧器利用率に関する分布曲線

中間ならびに配電用変電所別に当社実績について利用率分布曲線を求めると第1図となる。これを正規分布理論曲線に近似させ、第1表に示す平均利用率ならびに標準偏差を得た。

ここで変圧器は個々について経済的な運用がなされるのが理想であるが、実際には需用予測の



第1図 変電所利用率分布曲線 (支店別需要想定による)

*, **, ***, 関西電力株式会社 昭和38年3月6日受理「経営科学」第6巻3号

変動、変電所新增設工事の進捗状況、ならびに新增設による利用率の低下、事故停止等の不測の要因によって必ずしも最適運用が可能でない。

第 1 表
利用率による変電所分布 (支店別負荷予想による)

変電所	平均利用率 \bar{x}	標準偏差 σ
中間変電所	76.5(%)	20.9(%)
配電用変電所	74.7(%)	21.1(%)

るものであれば、過去の統計から求めた標準偏差を一定のものと考えて、変圧器に関する損失関数を与え、統計的な最適平均利用率を算出することができる。

1.2 損 失 関 数

利用率に対する損失関数として次にのべる各種条件式を与える。

1) 遊休分 KVA ならびに過負荷分 KVA に対する評価

変圧器が利用率 100% より上下して運転されれば、それだけ遊休ないしは過負荷利用が増加し、これに対する設備投資額の余剰が生ずるものとする。今ある利用率 x で運転される変圧器の余剰投資額合計を次式に与える。

$$g(x) = (1-x)\{a_0 - aM(x)\}M(x) \tag{1-1}$$

(記号)

$M(x)$; 利用率 x における変圧器平均容量 (MVA)

$a_0 - aM(x)$; " 変圧器 MVA 当り投資額 (円/MVA)

2) 利用率に対する寿命低下ま

たは延長の評価

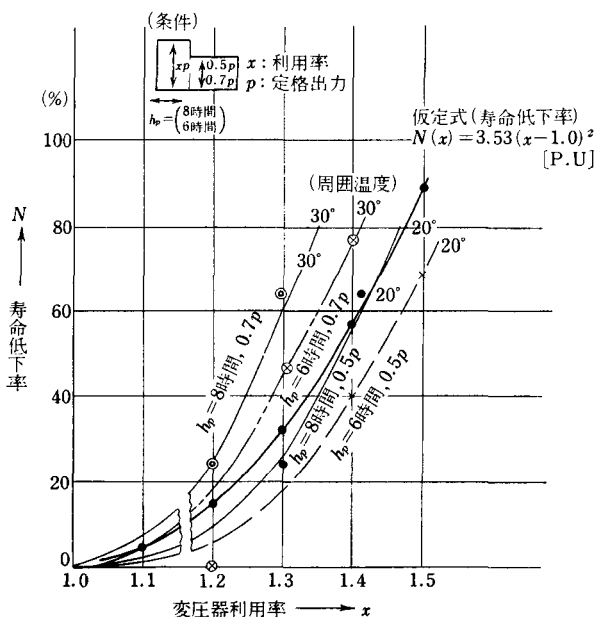
V. M. モントシガーによる変圧器寿命に関する実験式より、年間連続に同一な日持続曲線となる負荷をもつ変圧器の利用率と寿命との関係を求め、これをプロットしたものが、第 2 図である。これにより寿命曲線の近似式から、その設備換算費を次式に与える。

$x < 1.0$ において

$$h_1(x) = bx + c \tag{1-2}$$

$x \geq 1.0$ において

$$h_2(x) = dx^2 + ex + f \tag{1-3}$$



第 2 図 過負荷による変圧器寿命の関係

ところで最近 3~4 年の利用率分布曲線をみるに平均利用率こそ異なるが、その分布状態 (標準偏差) はほぼ一致している事実から、今仮りに以上述べた利用率に与える種々の要因が、今後も同じ状態で継続する

3) 銅損 (kW および kWh ロス) に対する評価

変圧器の kW および kWh ロスとして銅損があるが、後者は利用率によって変化せず、最適利用率決定の要因とはならないから、前者についてだけ考慮すればよい。

利用率 x における変圧器銅損は、利用率 100% 時のロスに対して利用率 x の 2 乗に比例することを付録 I に示したが、この定格容量における銅損は簡単に求められる。一般に利用率 x における銅損 kW ならびに kWh 損失費を次式に与える。

$$I(x) = g \cdot x^2 \quad (1-4)$$

4) サービスレベルに対する評価

変圧器利用率を向上すれば、1 台の変圧器事故に際し、負荷がシャ断される可能性が大きくなる。ここに、ある利用率で運転した際の見込シャ断電力量を算出し、サービスレベルに対する評価を検討したものである。

付録 II により利用率 x で運転する変圧器 1 台当りの見込シャ断電力量を次式に与える。

$$H(x) = m \left(1 - \frac{l}{x} \right)^2 \cdot x \quad (1-5)$$

この式によって求められる損失費は、販売価格以外に需用家に与える物理的、心理的損失の評価を大きく見込む必要がある。これを決めることは非常に難しい問題であるが、スエーデンの報告によれば、シャ断電力 20 セント U. S. /kW, 電力量 40 セント U. S. /kWh が与えられている。

1.3 最適利用率の算定

1) 計 算 式

1.1 では変圧器は利用率に対し、ほぼ正規分布することを示した。

1.2 では利用率に対し、変圧器の種々の損失を与える式を作成した。

本節ではここに全変圧器の損失額合計を求め、これが最小となる変圧器利用率の算定を行う。算出方法は周知の通り次式で求めることができる、

$$\frac{d}{d\mu} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x; \mu, \sigma) F(x) dx \right\} = 0 \quad (1-6)$$

$$(\text{記号}) \quad p(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

P ; 変圧器利用率に対する分布密度曲線

μ ; 平均利用率

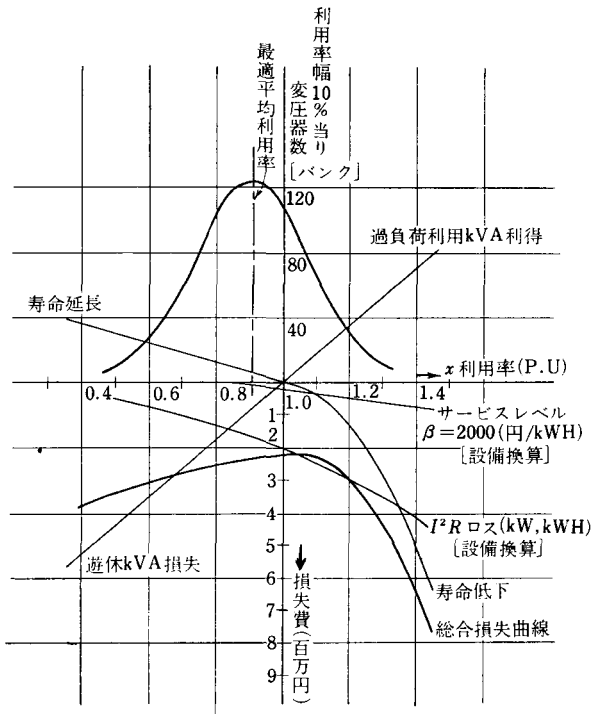
σ ; 標準偏差利用率

$$F(x) = g(x) + h(x) + I(x) + H(x)$$

; 利用率に対する総合損失曲線

2) 計 算 結 果

前項に与えた式 (1-6) の解を筆算により求めた結果を第 3 図に示した。



第 3 図 変圧器最適平均利用率算定結果

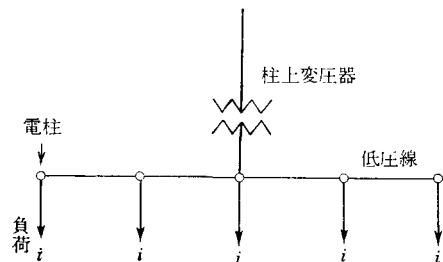
法ないし結果は一致するものと考えられる。

2. 変圧器運用方式に関する論理的考察

配電設備の経済運用の内で、最も重要なものの一つは柱上変圧器の負荷管理ならびにその運用方法にあり、配電部門における変圧器の運用はその性質上、高低圧配電線等を含めた総合的なものでなければならない。

ここに述べる方法は、一つのモデル化された配電系統を対象に新しい角度から論理的に柱上変圧器運用を決定する一試案を示したものである。

今第 4 図に示す様な配電系統について考えてみる。今低圧配電線路にそって均一な負荷が規則的に分布しており、 N スパンすなわち左右対称に総数 $(2N+1)$ 本の電柱の負荷が 1 台の柱上変圧器より供給をうけている。ここで 10 年間の負荷増加を考慮して、その間低圧線を含めた電圧降下条件、過負荷条件を満足しつつ、年経費の累計を最少とする柱上変圧器ならびに低圧線の運用方式（変圧器容量、取替時期、低圧線線種、受持負荷数）を決定する。



第 4 図 低圧側配電線形態

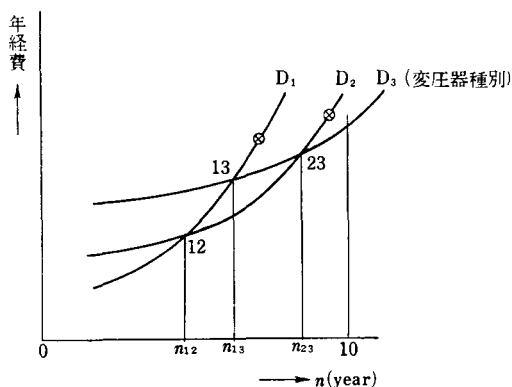
利用率 x に対し、下部に各損失曲線ならびに総合損失曲線を示した。また、上部に変圧器分布の標準偏差 $\sigma=0.17$ を与えた時の最適平均利用率とその分布曲線を示した。

変電所の新增設時期については以上によっては直接与えられないが、現在満負荷で新增設を行っている場合に平均利用率が μ となるならば、計算による最適利用率 μ_{opt} との差だけ新增設時期をのばせばよい。

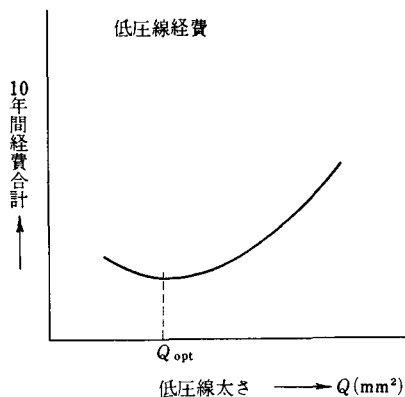
本計算では、ある年度についての実績にもとづいて算定を行ったものであるが、前述の通り、毎年の変圧器分布はほぼ正規分布をなしており、しかも偏差もほぼ一定である事実から、長期的な経済利用率としても、この算定方

第5図は変圧器容量別経費曲線である。もしも変圧器取替費用を考えないならば、経費最低となる変圧器容量および取替時期は直ちに求まる（すなわち変圧器 D_1 より出発して n_{12} 年目で D_2 に取替、 n_{23} 年目で D_3 に取替える）。取替費用が加わる場合は費用交点でこれを加え、各種運用コース例えば $D_1 \rightarrow 12 \rightarrow D_2 \rightarrow 23 \rightarrow D_3$ とか $D_2 \rightarrow 23 \rightarrow D_3$ とかの各経費合計を比較して最小となる運用方式

⊕ 電圧降下による制限(経費最小の低圧線使用時)



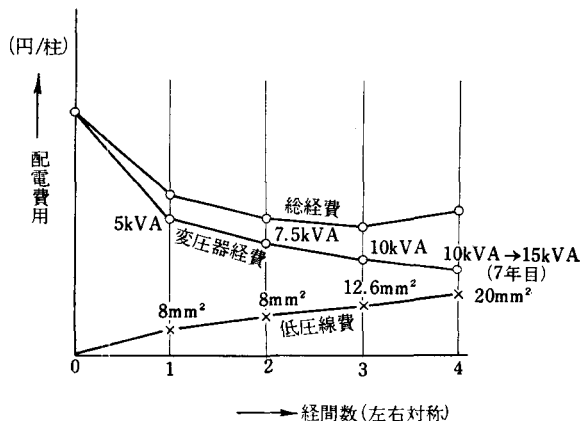
第5図 変圧器経費



第6図 低圧線経費

を求めればよい。ここで制限条件、例えば経費最小の低圧線使用時の電圧降下が制限にかかるコースは除外する。このようにして変圧器が受持つべき負荷数を各種変化した時の各経費を比較して最適運用方式を決定することができる。

第7図は変圧器が受持つべき各種負荷数に対して夫々の最経済方式決定時の電柱一本当り費用をプロットしたものである。これによると、変圧器1台当り電柱7本の負荷をとり、変圧器 10 kVA、低圧線 12.6 mm² を使用すれば諸条件を満足しつつ 10 年間経費が最小となる最適長期運用方式が決定された。



第7図 配電線の最適長期運用方式算定結果(一例)

以上は全く理想化されたものについて検討したものであるが、実用的には、年経費=現在価値換算の採用、不等率の導入、サービスレベル(供給信頼度)による修正、負荷予想の変動の影響加味、各種低圧線形態の検討等を行いたいと考える。

ま と め

変圧器の経済的運用方法について巨視的な立場から統計的に求める方法と他方微視的な立場から論理的に求める方法の二方式について考察した。これらは夫々立場は違っているが、その本質

はいずれも経済性を追求するところにあるので今後両者の融和を計りたい。

付 録 I

ある利用率 x で運転される変圧器について

$$x^2 = \frac{L^2}{K^2} = \frac{(L/E \cos \varphi)^2 R}{(K/E \cos \varphi)^2 R} \quad \text{記号} \begin{cases} L; \text{負 荷 (p.u)} \\ K; \text{定格出力 (p.u)} \\ R; \text{低 抵 値 (p.u)} \end{cases}$$

ある利用率 x で運転される全ての変圧器について

$$x^2 = \frac{L_1^2}{K_1^2} = \frac{L_2^2}{K_2^2} = \dots = \frac{L_n^2}{K_n^2} = \frac{\sum (L_i/E_i \cos \varphi_i)^2 R}{\sum (K_i/E_i \cos \varphi_i)^2 R}$$

したがって利用率 x で運転される全変圧器の損失電力合計は

$$\begin{aligned} \text{loss (p.u)} &= \sum (L_i/E_i \cos \varphi_i)^2 R = x^2 \sum (K_i/E_i \cos \varphi_i)^2 R \\ &= x^2 \sum K_i^2 R_i = (K^2 R)_{\text{mean at } x} \cdot x^2 p(x) dx \end{aligned}$$

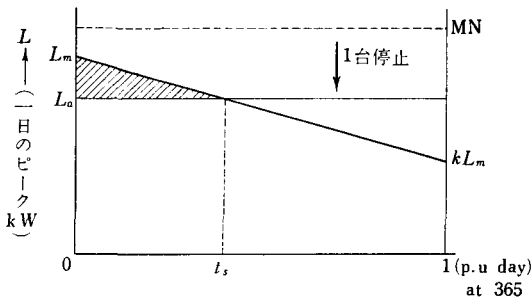
ただし $p(x)$; 変圧器台数密度 (p.u)

付 録 II

1. 負荷しゃ断可能日数 t_s

変圧器容量 M (MW), 変電所当り変圧器台数 N (台), 応援電力 G (MW), 許容過負荷率 V とすると, 変電所供給可能電力は MN (MW), 1台停止時の供給可能電力は

$$(L_a = (N-1) \times V \times M + G \quad \text{(MW)} \quad (1)$$



第 1 図 変電所年間 duration Curve

となる。

第 1 図は変電所の負荷持続曲線を簡単のため直線で示したものである。ここで 1 台停止によって (2 台以上同時に停止する可能性は考えない) 供給可能電力量より負荷が上廻る場合に負荷がしゃ断される可能性があり, 年間 t_s 日がある可能性のある日数とする,

$$L_m - (1-k)L_m t_s = L_a \quad \therefore t_s = \frac{L_m - L_a}{(1-k)L_m} \quad (2)$$

(記号) L_a ; 変電所内の 1 台の変圧器が停止した時の供給可能電力

L_m ; 年間最大電力

kL_m ; 年間最小電力

ここで変圧器利用率を x とすると,

$$x = L_m / MN \quad \therefore L_m = MNx \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入して

$$t_s = \frac{1}{1-k} \left(1 - \frac{L_a}{MNx} \right) \quad (p.u \text{ days}) \quad (4)$$

を得る.

例えば $N=2$ (台), $M=10$ (MW), $V=1.2$ (倍), $G=4$ (MW) とすると, 式(1)より $L_a=1.2 \times 10 + 4 = 16$ (MW), 式(4)より年間負荷しゃ断のおそれのないような変圧器利用率は $\frac{16}{10 \times 2 \times x} - 1 = 0 \quad \therefore x = 0.8$ すなわち 80% 利用率 (年間 peak 時) 以下で使用すればよい.

2. 見込しゃ断電力量 H_y

しゃ断可能日数 t_s に対するしゃ断可能電力量は第1図の斜線部面積で示される. 第1図は1日のピーク電力の年間 duration であるから, 今簡単のため1日の duration は peak 8時間を与え, 復旧迄の時間を t_0 とすると, 負荷しゃ断電力量は

$$\frac{1}{2} \times t_s \times (L_m - L_a) \times \frac{8}{24} t_0 \quad (5)$$

式(2)を代入して $= \frac{1}{6} (1-k) L_m t_s^2 t_0$

式(3), (4)を代入して $= \frac{t_0}{6(1-k)} \left(1 - \frac{L_a}{MNx} \right)^2 MNx$

式(6)は1変電所当りのしゃ断電力量であるので, バンク当りでは N で除せばよい.

ここで, 変圧器が年間 100 台中 1.5 台が事故を発生する. すなわち事故確率 0.015 を仮定するとし1台のバンクが年間で事故を発生する確率バンク当りの見込しゃ断電力量 (年間) H_y は

$$H_y = 0.015 \times \frac{t_0}{6(1-k)} \left(1 - \frac{L_a}{MNx} \right)^2 Mx \quad (\text{MWH}) \quad (7)$$

IAOR をお読み下さい

OR に関する世界各国の文献が一目でわかるようにとの意図で, IFORS の事業の一つとして IAOR (International-Abstract on OR) が昨年度から刊行されていることは御存じだと思います. このほど第1巻が予定を超過して5冊で完結しました.

この調子では, ますます充実して行くことと思われまますので, まだ購読お申込になっていない方々に御購読をおすすめ致します. 第1巻申込切後個々に申込れた方のために追加注文しております. 第1巻御希望の方は至急お申出下さい.

なお, この雑誌は加盟学会を通じて配布を受けなくとも, 公売しておりますが, その際の値段は, はるかに高くなりますから, 学会員の方は学会を通して購読されることをおすすめ致します.
