

## シミュレーション・モデルによる柱上変圧器<sup>†</sup> 運用問題の検討について

内 村 桂 典\*  
小 柳 伸\*

### はじめに

電力設備のなかで配電設備は需要家に密接し、設備単位は小規模であるがその数が膨大であることが特色となっている。配電システムの主要設備は支持物(電柱)・電線ならびに柱上変圧器で構成される。

柱上変圧器は高圧(3 kV/6 kV)から低圧(100 V/200 V)へ降圧する装置であるが、低圧負荷の増加に伴って負荷電流がある限界をこえると更新<sup>1)</sup>(容量変更, 負荷分割)を行なう。毎年の更新台数は九州電力の例で約5万台にもおよび、その更新政策は配電設備全体の経済性を左右する重要な要素となっている。すなわち負荷に対して小さい変圧器を施設すると、更新のサイクルが短くなって費用がかさみ、逆に余裕度を大きくとれば設備の利用率は低下し過剰投資のおそれが出てくる。

柱上変圧器の運用上の問題点として

- (a) 変圧器の適正利用率(初期利用率・最終利用率など)
- (b) 適正な規格値シリーズの設定
- (c) 更新の方法
- (d) 低圧電線との組合せ

などがあげられる。

政策の決定にあたっては長期的にみて経済的であることは勿論であるが、需要の増加・技術革新の動向・在庫管理などの面から見ても矛盾のないものでなければならない。

このような柱上変圧器の運用に関する総合的検討を行なうためには、現状における設備と負荷の実態・将来の負荷増加率・年経費・所要資金等をおりこんだダイナミックな解析が必要で、シミュレーションによる方法が適当と思われる。

<sup>†</sup> 1968年8月14日受理, 1967年11月9日 秋季研究発表会講演

\* 九州電力株式会社

## 1. モデルの設定

ランダム・サンプリングにより柱上変圧器設備の1/nモデルを作成し、柱上変圧器1台毎に毎年の負荷増加の状況をシミュレートし、これをベースとしてTヶ年間の更新のシミュレーションを行なう。すなわち負荷増加率・柱上変圧器の規格値シリーズおよび更新方法は種々の検討ケースを設定し、最適な規格値およびその運用に関する情報を得ようとするものである。現行の規格シリーズは一般につきの9器種（JIS規格）である。

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
容量 kVA	2	3	5	7.5	10	15	20	30	50

表1 柱上変圧器容量段階（現状）

### 1.1 モデル数

モデル数はここでは柱上変圧器利用率の分布に着目し、単純任意抽出法により算定する。実態調査例によれば

$$\text{平均利用率 } \mu=1.15 \quad \text{利用率標準誤差 } \sigma=0.25$$

信頼度95% ( $t=2.0$ )、サンプリング誤差  $d=10\%$  とすると標本の大きさ  $n$  は次のように決定される。

$$n \geq \frac{t^2 \cdot \sigma^2 / d^2}{1 + t^2 \sigma^2 / (N \cdot d^2)} \doteq \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{d^2} = \frac{2^2 \times (0.25)^2}{(0.1)^2} = 25$$

9器種あるので

$$n \geq 25 \times 9 = 225$$

ここでは設備の1/1000モデルを考え、240台の初期モデルを現状の容量別構成比に対応させて表2のとおりを設定した。

容量(kVA)	2	3	5	7.5	10	15	20	30	50	計
モデル数	15	47	47	35	31	28	20	13	4	240
構成比(%)	6.3	19.6	19.6	14.6	12.9	11.7	8.3	5.4	1.6	100

表2 初期モデル

なおモデル数はこのような理論値のほか、コンピューターの容量や計算時間の制約があり、この面からきまってしまう場合も多いと思われる。

### 1.2 初期利用率

利用率は次式により定義する。

$$\text{利用率} = (\text{最大負荷電流}) \times 100 / (\text{定格電流})$$

昭和41年度のサンプリング調査結果によれば利用率分布は図-1に示すように

$$\text{平均 } \mu=1.15 \quad \text{標準偏差 } \sigma=0.25$$

- 1) 容量変更；負荷が限界をオーバーした場合さらに大きい容量の柱上変圧器に取替えること  
負荷分割；負荷が限界をオーバーした場合2つの柱上変圧器に負荷を分割すること

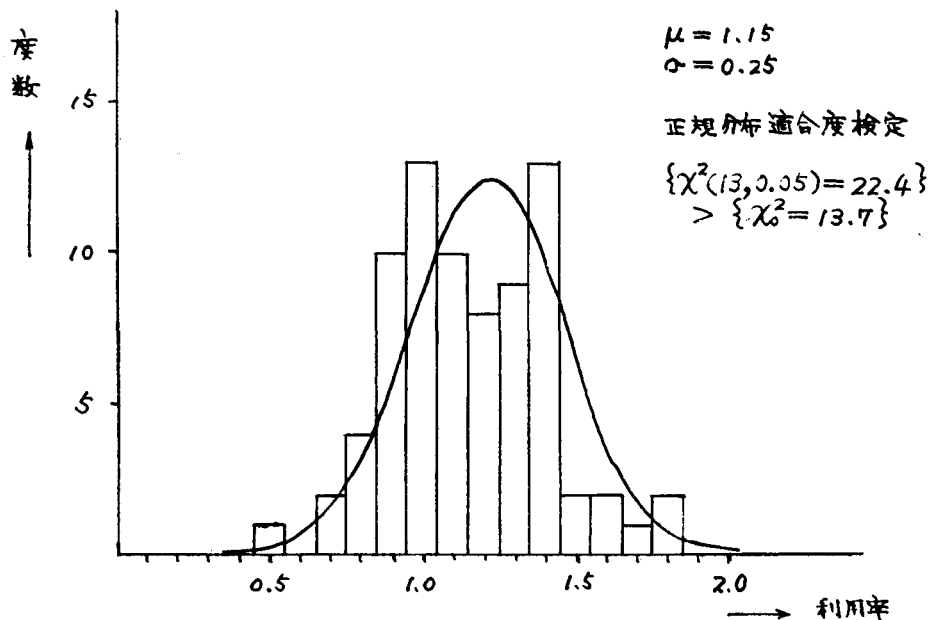


図1 柱上変圧器利用率の分布

の正規分布<sup>2)</sup>として取扱うことができる。

シミュレーションではこの分布に従って各モデルに利用率をランダムに割当てる。

### 1.3 負荷増加率

電気事業のような設備産業において設備の更新や拡充計画は将来の負荷がどうであるかという長期負荷想定が基本となる。従って負荷想定はそれ自体がひとつの大問題である。

このような不確定要因の取扱いとしては、水準をかえていろいろな場合の検討を行なってみることが有効であろう。さらにキメの細かい見方をすれば都市部・郡部などの地域差も問題となるが、長期的な地域差を追求することは困難であるためここでは柱上変圧器個々のバラッキの中を含めてとらえることとし、マクロ的に負荷増加率の分布という形でおりこんだ。

負荷増加率の分布は正確に調査することは困難であるが、一般的に正規分布に近いことが予想される。このため増加率は平均を $\mu$ としたとき、その標準偏差を $\sigma = \mu/3$ とする正規分布に従うものとして取扱うこととした。

### 1.4 更新の方法

低圧負荷は一般に電灯と動力で構成されるが、家庭電化などの旺盛な需要に支えられて毎年14%程度の増加がみられる。これにともなって柱上変圧器の利用率は向上する。

2) 柱上変圧器利用率の実態調査は対象変圧器にダイヤモンド・メーター、記録電流計等を取付け一昼夜測定を行なうためかなりの業務量となり、本検討には78個程度のデータしか得られず、分布型を云々するには十分なデータ量ではなかったかと思われる。

調査対象としては動力専用変圧器は除き電灯専用のみに限ったので異種データの混合は一応考えられず、また分布型も定性的に単峰の1.1附近を平均とした左右対象の分布となると判断するほうが自然である。

データの層別については、都市部・郡部間、kVA間の検定を行なったが有意差は認められなかった。

この利用率の上限（過負荷限度）は変圧器自体の条件としては絶縁材質や鉄心材質および設計条件などにより異り、負荷側の条件としては最大負荷の持続時間などによって異なるものであるが、現行規格のもとでは一般に140%~160%程度と考えられている。

限界をオーバーしたものは容量変更または負荷分割による更新を行なうが、数十万台（九州電力の場合24万台）にもおよぶ施設を個別に管理することは困難である。従って更新対象の発見については実測法・推定計算法などいろいろの対策が考えられているが、一般に推定計算により管理対象としての過負荷変圧器を選びだしこれを実測によりチェックするという抜取測定のみが多いようである。この場合管理外れをどの程度におさえるかということが問題となるが、今回は実績より5%程度をおりこむこととした。

## 2. シミュレーション

### 2.1 シミュレーションの概要

シミュレーションの概要は図—2 にしめすとおりである。

初期利用率・負荷増加率等パラ

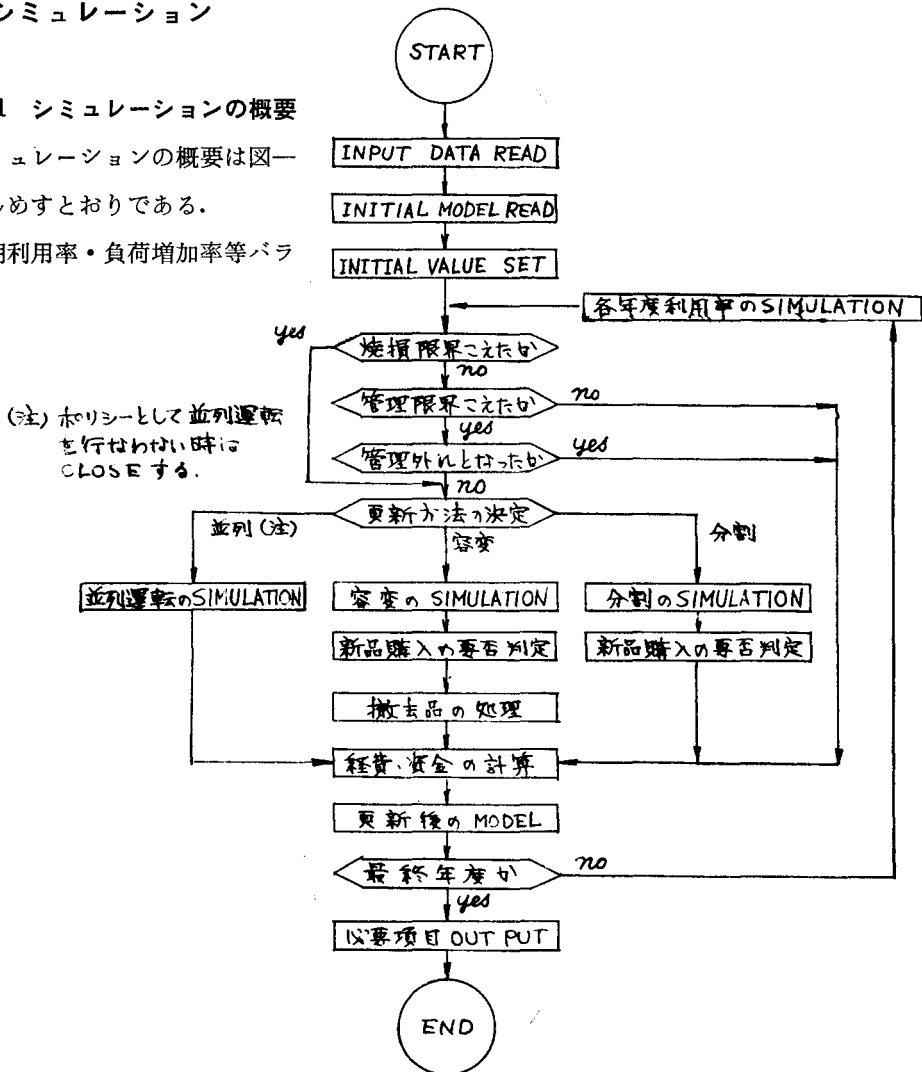


図2 柱上変圧器更新のシミュレーションの概要

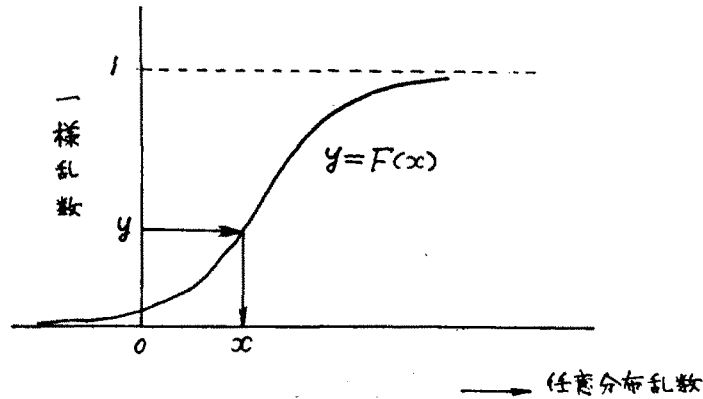


図3 任意の確率密度の乱数の作成

ツキのあるものは確率分布によりつぎのような方法でモンテカルロ・シミュレーションを行なう。確率密度関数を  $f(x)$  とすると次式であらわされる  $F(x)$  はその分布関数である。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

いま  $y$  を区間  $(0, 1)$  の一様乱数で与えると

$$y = F(x)$$

より任意の分布の乱数  $x$  が得られる。この関係を図-3に示す。

## 2.2 検討ケース

### (1) 規格シリーズ

更新の台数は毎年数万台にもおよぶのでこれを合理的に処理してゆくためには、その都度いちいち適正容量について検討するのは不便である。最も現実的かつ簡単なルールは上位容量（より大きい容量）に取替る場合のステップ・アップ段数を一定にしておくことであり、この場合つぎのような点が問題となる。

- (a) ステップ・アップ段数
- (b) これに対応した規格シリーズ

本稿におけるアプローチはこの考え方を基本としているが、柱上変圧器の規格は一電力会社の事情によって独自のものを設定するのは好ましくなく、基本仕様はJIS規格（表1）に準拠しその中から実際に使用する器種をもって規格シリーズを設定するのが現実的であろう。しかし将来は負荷単位がさらに大きくなるであろうことを予想して、最大容量 100 kVA まで考慮し表3のような規格シリーズについてシミュレーションを行ない、最も経済的なものを選定することとした。

### (2) 負荷増加率

T年間のシミュレーションを行なうわけであるが、過去の実績より判断し今後相当の期間の低圧負荷は毎年14%程度が見込まれる。しかし将来はやや鈍化することが予想されるが低く見積っ

種類	規格シリーズ	ステップ・アップ段数	分類	備考
A	5 7.5 10 15 20 30 50 75 100	1	A-1	現 状
		2	A-2	
		3	A-3	
B	7.5 10 15 20 30 50 75 100	2	B-2	
C	5 10 20 50 100	2	C-2	
D	10 20 50 100	1	D-1	C-2ケースで5kVAを5ヶ年間で漸減する
		2	D-2	
		2	D-2'	
		3	D-3	

(注1) 段数の数え方は表-1による。

表3 柱上変圧器規格シリーズの検討ケース

年 度	昭37	38	39	40	41	平均
負荷増加率	14	13	15	12	15	14

表4 低圧需要増加率実績 (単位 %)

でも毎年6%を下まわらないと思われ、この程度の巾をもって推定すればほとんどあらゆる場合をカバーするであろう。

これより前項の規格シリーズの各に対し負荷増加率は6%、10%、14%の3種につきシミュレーションを行なってみる。

### 2.3 更新のシミュレーション

シミュレーションにおける更新の方法はつぎの手順による。

- 更新 (容量変更または負荷分割) の時期は利用率が上限 (ここでは140%) を超過した時点とする。このうち $\alpha\%$  (5%) は管理外れとして残るが200%を超過するものは焼損するものとして必ず更新する。
- 更新変圧器のうち実態にもとずいて  $P\%$  (25%) は負荷分割、 $Q\%$  (75%) は容量変更を行なう。
- 負荷分割の方法は1/2分割<sup>3)</sup>とし、既設変圧器はそのままで別に1台新設する。(この条件は実際運用上は常に正しいとは限らない)
- 新設変圧器の容量は初年度利用率  $R\%$  (100%) 以下となる最小容量とする。
- 容量変更の場合は現実の運用を考慮して自動的に上位のステップに取替えるが、この場合ステップ・アップの段数はいろいろなケースについてシミュレーションを行なう。

3) 負荷分割の方法は現実的には負荷の地理的条件やその他の外部的要因で決まるため、負荷分割率を0.5と固定することは平均的にみて大綱を誤まらないものと思われ、分割率が特別の分布に従がいランダムに発生するとは考えていない。しかしプログラムは客観状況の変化にも対処できるよう負荷分割率を汎用化しておく必要があると思われる。

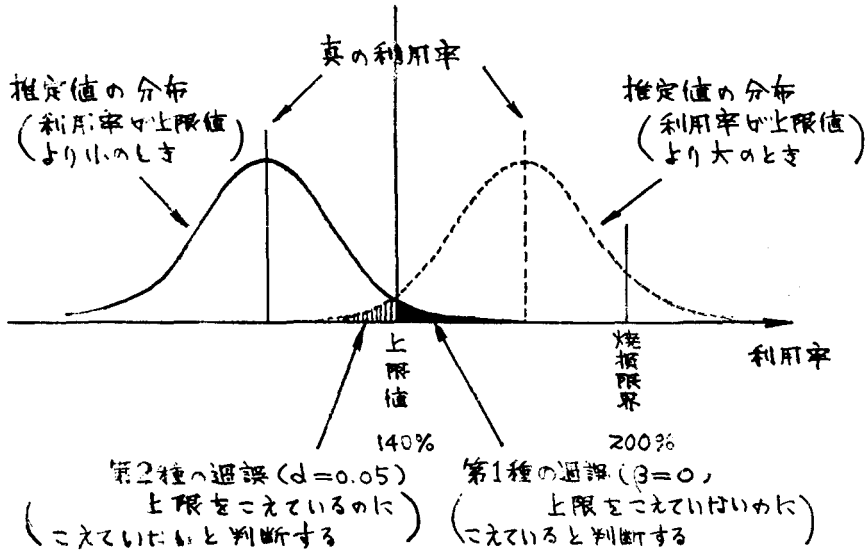


図4 管理外れの説明

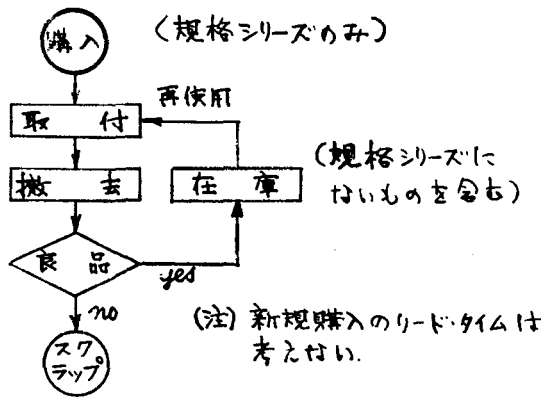


図5 柱上変圧器運用のルーチン

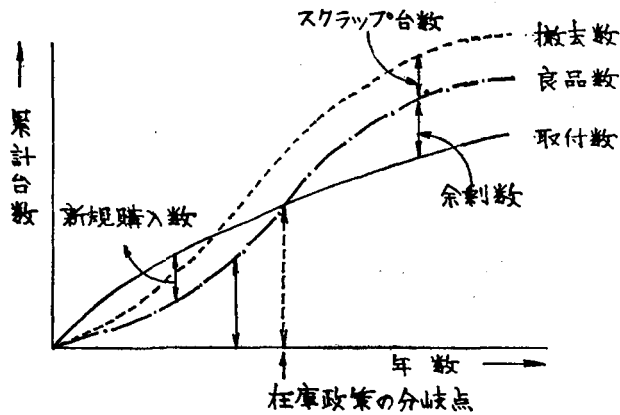
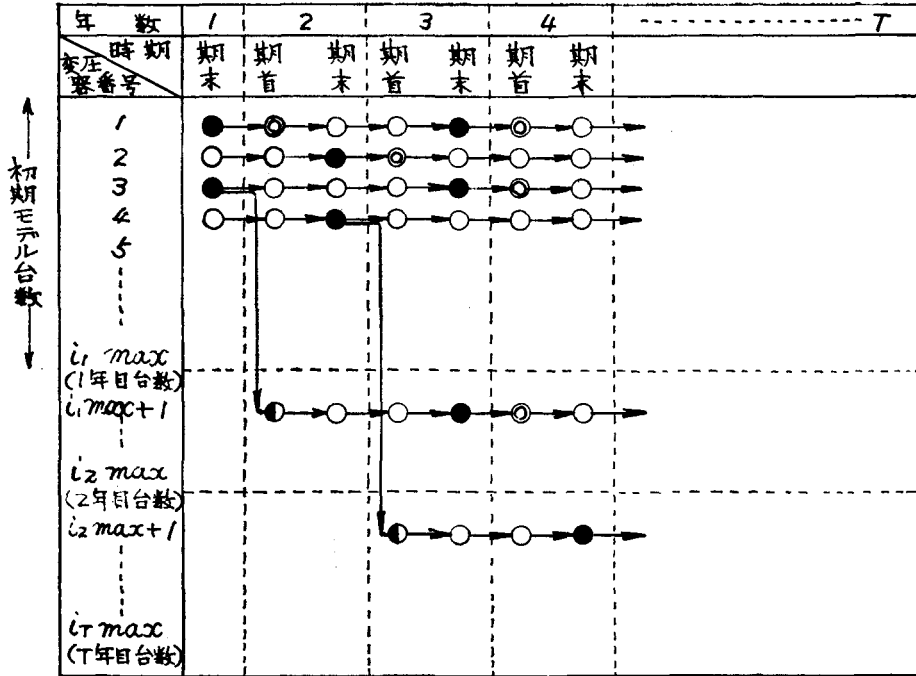


図6 在庫数と購入数の推移



- 注
- 既設変圧器
  - 更新対象変圧器
  - ◎ 容量した変圧器
  - ⊗ 負荷分割により新設した変圧器

図7 シミュレーション・モデルの推移

(f) 容量変更にもともなう撤去品のうち S% (83.5%) は良品として在庫にくわえ、残りは不良品としてスクラップ化する。なお焼損品は当然スクラップとなる。

(g) 必要な変圧器は撤去品の在庫があればこれを再使用する。在庫がない時はその容量が規格シリーズにあればこれを購入し、なければさらに1段上位に移る。規格シリーズはいろいろな場合についてシミュレーションを行うが、常に撤去品を優先使用する。

このように取扱うことにより新規購入を必要とする数と撤去品（中古品）の再使用の数が明らかとなる。この概念を図-6に説明する。

(h) 負荷増にともなって柱上変圧器のユニット容量はしだいに増大するので小容量のものはやがて余剰を生ずるはずである。このような余剰品の取扱いはポリシーに関する問題であるが、ここでは並列運転などにより有効利用をはかるものとした。

シミュレーション・モデルの経年推移を図7にしめす。

### 2.4 経済計算の方法

電気事業において必要な投資のうち公益的な要因によるものは、個々の対策案のなかで年々の経費が最小となるような案を最適とするいわゆる経費比較の考えにもとづく方法が一般に用いら



れる。この場合既設部分の経費は各案共通とみなされるから、比較のうえからいえば総経費を考える必要はなく増分経費に着目すればよい。

本稿でもこの考えをベースとした経済計算を行なう。

変圧器の更新に関する経済計算において特徴的な点は耐用年限が長く、しかもスクラップとなるまで機能的には劣化しない事である。このため再使用の変圧器でも使用価値は新品と同等であるが、反面市場価格はスクラップ程度しかないという矛盾がある。

なお電力設備投資の経済計算は長い期間に継続して行なわれる一連の設備投資計画の比較においてなされるのでその経費比較期間が重要な問題となる。一般的にいえばできるだけ長期にわたることが望ましいが

(a) 将来の投資計画・需要・技術革新等の不確定要素が大きく長期にわたっての精度は期し難い

(b) 計算期間が長いほど先行投資が有利になる傾向をもつこと

などを考えると期間のとり方は現実的な限界があるわけで10～15年程度をとるのが普通である。ここでは15年としてシミュレーションを行なってみた。

#### (1) 平均年経費 (PV)

経費計算期間の平均年経費 (PV) の計算式は次による。

$$PV = (CC + OC + LC) \cdot C(t)$$

PV; 平均年経費

CC; 資本費

OC; 運転費 (含修繕費・固定資産税)

LC; ロス費

C(t); t 年間の資本回収係数

#### (2) 資本費 (CC)

増分経費の比較を行なうためのものであるが特に再使用品に関し

(a) 評価尺度について決め手がないこと。

(b) 撤去品は良品であれば必ず再使用すること

などを考慮してつぎの方法で計算を行なう。

(a) 材料費は新品を使用した時のみ計上する。

(b) 経費計上期間は撤去時間のいかにかわからず、新設時点から検討終了時期までとする。すなわち撤去後T年間の経費は以後その変圧器が再使用された場合の経費に対応するものとした。このため撤去品を流用する場合の経費は新たに考えなくてもよいことになる。

このように取扱うことにより計算の簡略をはかることができるが、比較計算という限りにおいては大綱をあやまらなないと考える。

資本費の計算は次式により行なう。

$$CC = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{JMAX} \{A_{tj} \cdot \alpha \cdot \varphi(T-K) + B_{tj} + D_{tj}\} \cdot F(K)$$

$A_{tj} > 0$  のとき  $K = t$

$j$ ; 変圧器番号

$t$ ; 年度

$JMAX$ ; 変圧器台数

$K$ ; 設置年度

$T$ ; シミュレーション期間

$A$ ; 材料費

$B$ ; 工費

$D$ ; 撤去工費

$\alpha$ ; 年経費率

$\varphi(T-K)$ ;  $(T-K)$  年間の累計現価係数

$F(K)$ ;  $K$  年度の現価係数

なお経費の割引率は経済計算を左右する重要な要素であるが、電気事業においては標準報酬率を考慮し8%程度を用いることが多い。

### (3) 運転費 (OC)

運転費をここではつぎのように定義する。

$$\text{運転費} = (\text{固定資産税}) + (\text{修繕費}) + (\text{管理人件費})$$

これより kVA 毎の年間運転費をあらかじめ計算しておき次式により全部のモデルについて計算する。

$$OC = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{JMAX} U_{tj} \cdot F(t)$$

$U$ ; 容量別運転費

### (4) 損失費 (LC)

電力損失は対象系統の増分発電コストによって評価され、その評価方法については議論も多いが基本的には電源開発のコストに見合う kW 成分と発電コストに見合う kWh 成分にわけて評価するのが普通であろう。ここでは便宜上負荷率を考慮し、kW 成分は kWh 評価に換算し一本の単価により計算する方式を用いる。変圧器の損失電力には鉄損と銅損がありこれらの合計を次式により計算する。

$$LC = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{JMAX} (LCU_{tj} \cdot r^2_{tj} \cdot CU + LFE \cdot FE) \cdot F(t)$$

$LCU$ ; 定格負荷に対する銅損

$CU$ ; 銅損単価

$LFE$ ; 鉄損

$FE$ ; 鉄損単価

$r$ ; 変圧器利用率

### 3. シミュレーション結果

初期値として 1/n モデルを設定した場合のシミュレーション結果は n 倍することによって母平均を推定することができるわけであるが、ここでは例として生のままの数値により述べてみる。

#### 3.1 経済性

平均年経費と取替サイクルの関係を図8に示す。低圧需要の増加率が10%~14%付近であればD-2ケース(すなはち規格シリーズは10-20-50-100kVAで取替方法は2段アップ)が年経費最小である。

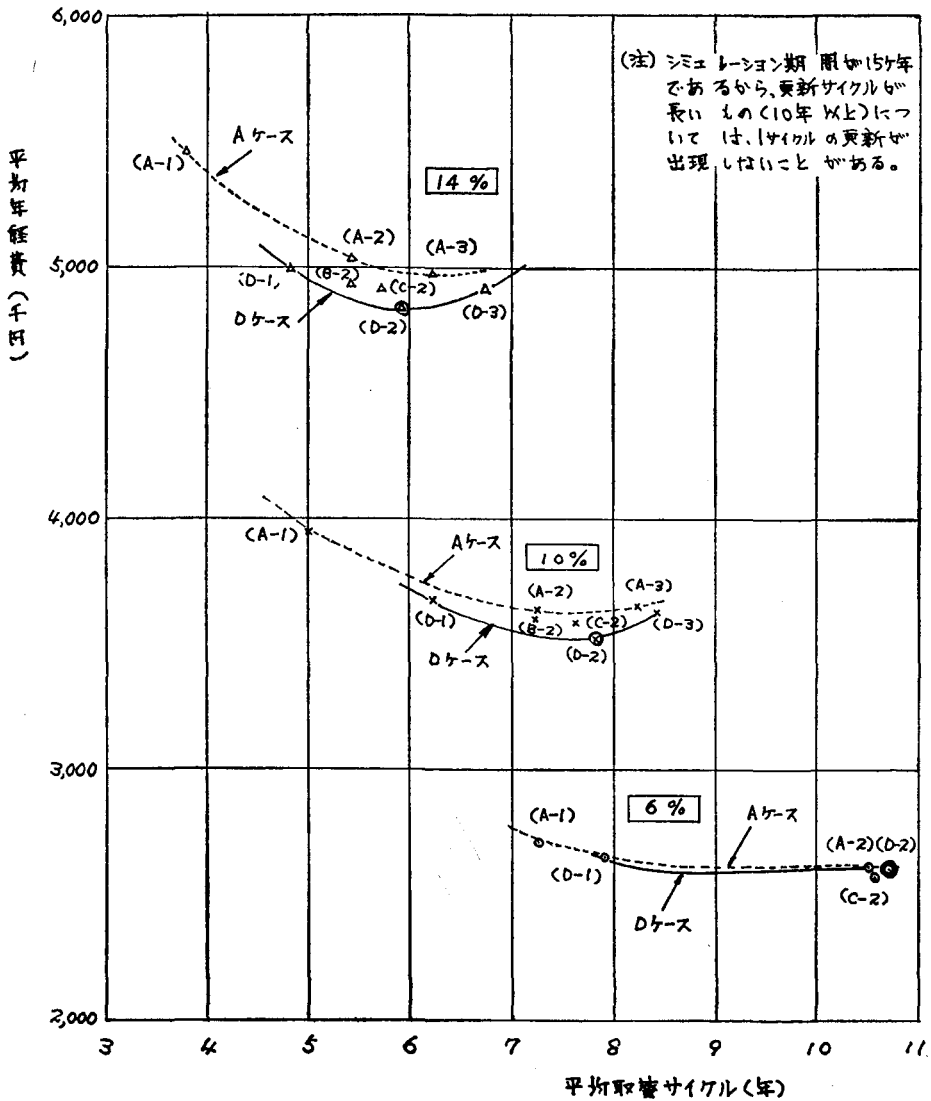


図8 平均年経費と更新サイクル

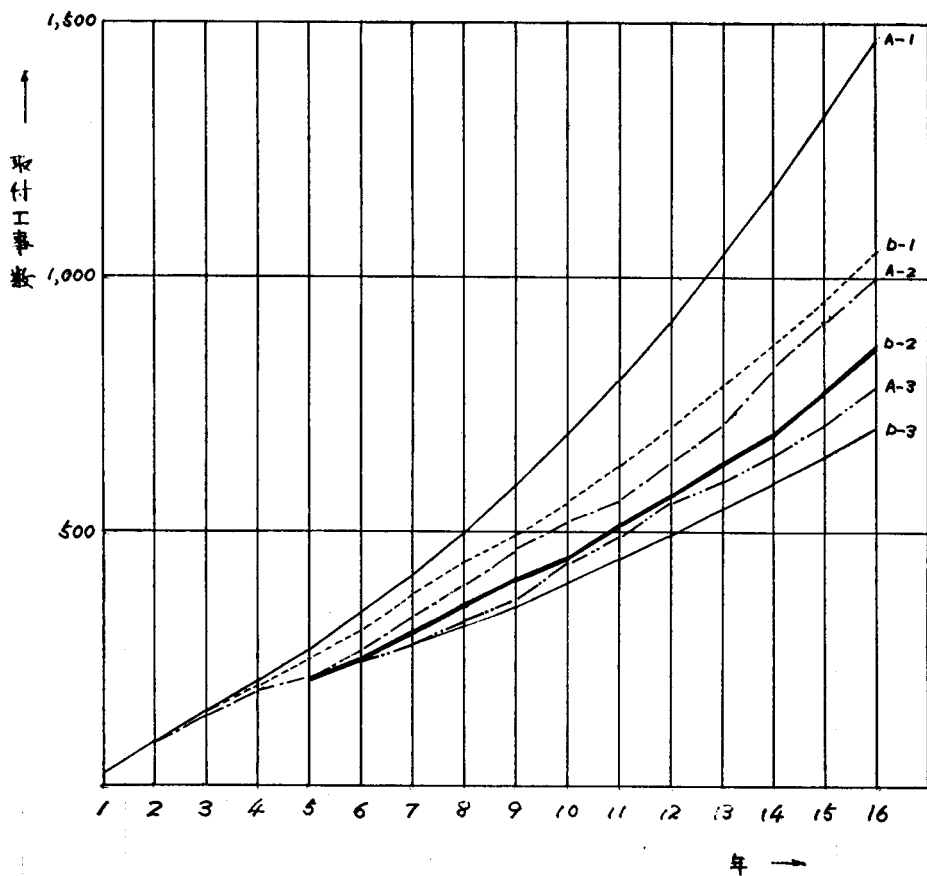
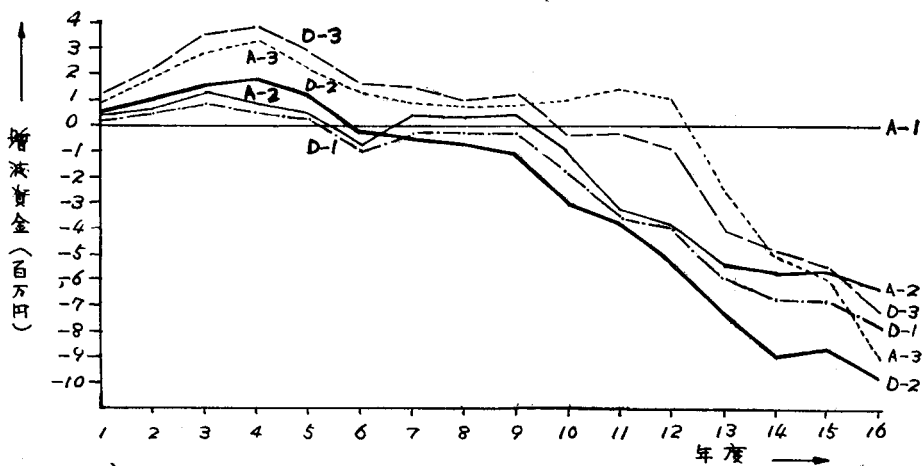


図9 累計取付工事数推移グラフ (負荷増加率14%)

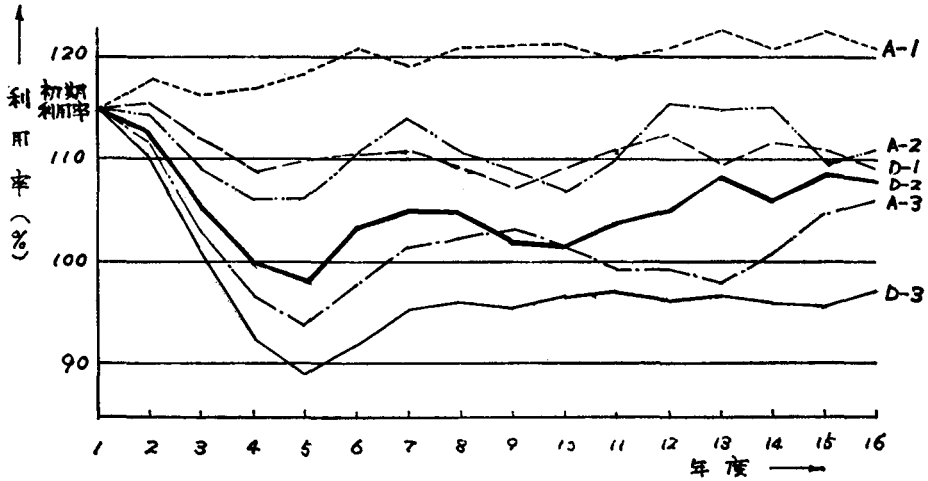


注1. A-1ケース(現行)に対する累計資金の増減で比較したものである  
 注2. 資金は利率による割引前の金額である

図10 累計所要資金の比較 (負荷増加率14%)

負荷の増加が6%程度まで低下すればD-2ケースとC-2ケースはあまり差がない。すなわち負荷増加率が低下すれば小容量の有利性が現われることを示しており傾向的にステップアップ巾をかえることによる経費差は小さくなる。

また更新サイクルの面から見れば負荷増加率14%では6年程度、10%では7~8年、6%では



注1. 
$$\text{利用率} = \frac{\text{最大負荷電流}}{\text{定格電流}} \times 100$$

注2. 年間最大利用率をあらわす。ただし初期値は調査時点の数値

図11 平均利用率の推移 (負荷増加率14%)

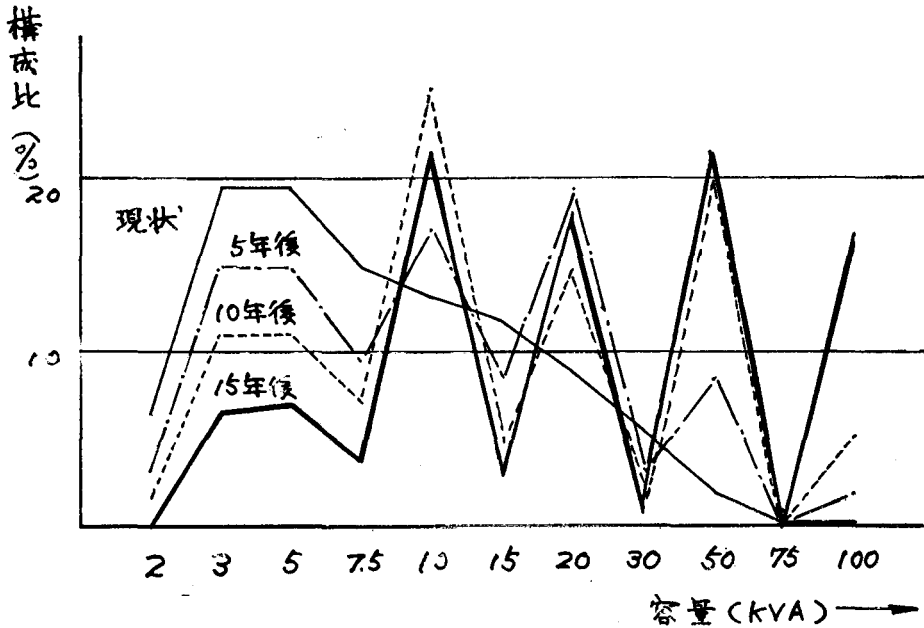


図12 容量別構成比の推移 (D-2ケース 負荷増加率14%)

9年以上が経済的であることがわかる。

### 3.2 工事数および所要資金

長期的にみた工事数は取替のステップアップ巾が大きいほど少なくてすむわけでこのありのままを図9に示す。

所要資金の面から例示すると図10のとおりである。図は現行ケース（A-1）に対する増減の形で示したものであるが、ステップ巾が大きくなるに従って初めの数年間は所要資金が増し、や

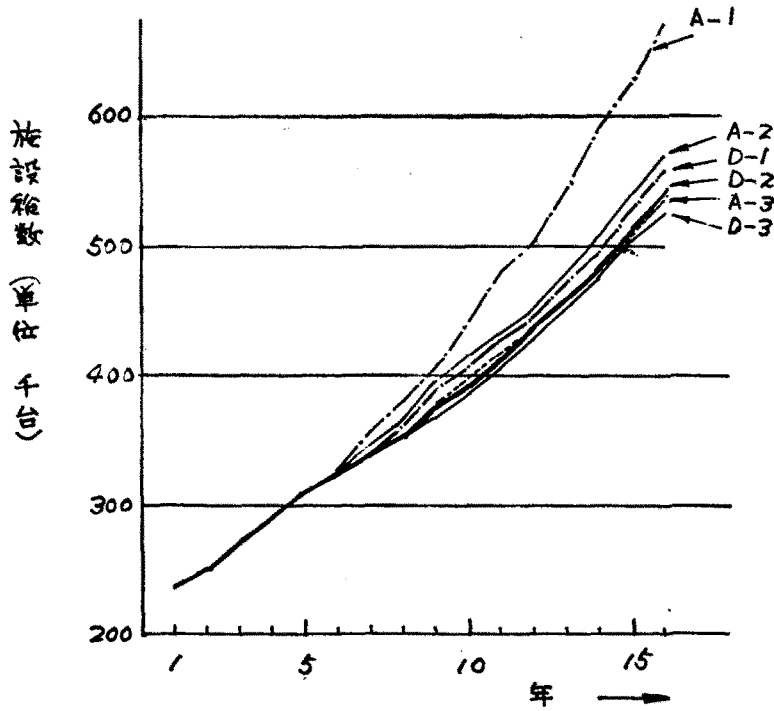


図13 施設総数の推移（負荷増加率14%）

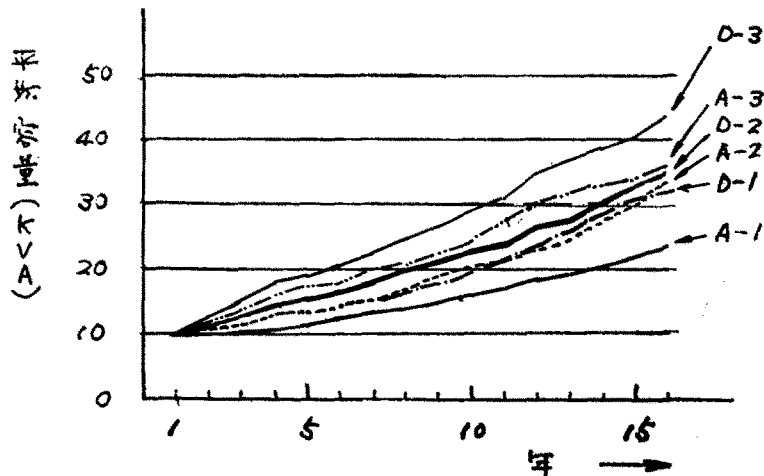


図14 平均容量の推移（負荷増加率14%）

がて先行投資の効果が現われ将来は大巾な資金の節減が期待できることを表わしている。その程度は設備の規模・負荷増加率などにより異なるが、負荷増加率が14%程度では資金面からみてもD-2ケースが有利となっている。

現実の政策決定に際しては年経費だけでなく、とくに至近年度の所要資金の量が重要なキーとなるのでこれらを総合勘案し、経過処置をおりこんだ折衷案を採用することも考えられる。

### 3.3 利用率

負荷増加率14%の例について平均利用率の推移を図11に示す。経済性においてD-2ケースが最も有利と判断したわけであるが、この場合の平均利用率は105%前後となっており、過負荷限度を140%としてもかなりの余裕をもった供給を行なうことができることを示している。

### 3.4 施設数の推移

施設の推移を図12、図13に示す。これより容量別の構成がしだいに大量にシフトし規格シリーズにない器種は自然淘汰的に減少する状況がわかる。また施設数の増加状況についてもわかるので設備管理の方策に関する基礎資料を得る。

変圧器平均容量の推移を図14にしめす。

### 3.5 結論

シミュレーションによっていろいろの情報を得たわけであるが、当面でもっとも重要な結論はつぎの2点である。

- (a) 規格シリーズは10—20—50—100 kVA とする（すなわち新規購入はこの4種類にかぎる）
- (b) 容量変更の方法は2段アップを原則とする。ただし所要柱上変圧器がシリーズにも在庫にもない時は3段アップとなる。

新シリーズの移行により設計業務、在庫管理等の付帯的な合理化が期待できるが実際問題としては

- (a) 移行の時期
  - (b) 一挙に全面移行するか、漸減するかなど経過処置の問題
- など総合判断が必要であろう。

## おわりに

このシミュレーション・プログラムはFORTRAN IVでコーディングしたが、汎用化を考慮し、インプット・データによりいろいろな条件の変化に対応できるようにした。

なおシミュレーションにおいてつぎのような問題を含んでいる。

- (a) 柱上変圧器の運用は低圧線との関連があるので、理想的にはこの点を考慮すべきである。これは当社では低圧電線の太さが5段階程度に分かれており、負荷増加に伴い張り替えを行

なうのであるが、ここまで問題を展開させるとさらに供給電柱本数・初期利用率・更新基準・電圧降下限度、変圧器の位置など配電設備全体としての最適計画という大きな問題となってくるので、今後この点については別途とりあげたい考えである。

- (b) 検討結果は当然のことながらその時点のインプット諸元およびポリシーとして与える条件（たとえば過負荷限度や分割の割合など）により変わるものである。このような客観状勢の変化があれば、その時点で再検討する必要がある。
- (c) 電子計算機による総合事務機械化が進展している状勢の中で、今後はたとえば柱上変圧器の負荷管理・設備管理といった視点からのアプローチも必要と思われる。
- (d) 条件としてのポリシーについては、それ自体の最適性も一つの問題であり、このシミュレーションの中で同時に検討することは可能である。