コンピュータの電源システムにおけるバッテリー容量の信頼性評価†

安井一民†† 中川覃夫†† 本告光男††

コンピュータ・システムの使用信頼性向上問題は，通常，環境・保全・運用の3つに大別して考察されているが，いわゆる電源システムの安定性の問題は，環境信頼性向上問題における基本的な課題である．わが国の商用電力の質は，諸外国に比べ極めて高いレベルにあるが，雷発生期における瞬断や瞬時電圧低下は頻繁に発生しており，また比較的長時間の一般停電も頻度は少ないが発生しているのが現状である．このため，主要コンピュータ・システムにおける供給電源は，一般商用電源の障害時に対応して，バッテリーや自家用発電機などの予備電源を確保することにより，その安定性を保障している現況にある．ここでは，電源システムにおける一般停電に関して，信頼性と経済性の問題を考察する．すなわち，コンピュータ・システムの電源が，通常の商用電源の障害時に，バッテリーおよび予備発電機によってバックアップされる信頼性モデルを設定する．そして，コスト有効性の考え方を導入してコスト／アベイラビリティ比を求め，それを最小にする最適なバッテリー容量の大きさを議論し，数値例による考察と評価を行う．

1. はじめに

最近，フォールトトレランス技術の進展とともに，コンピュータ・システムの運用・保守段階における使用信頼性の向上方策が種々考案されてきている[3),4)]．

コンピュータ・システムの使用信頼性向上問題は，通常，環境・保全・運用の3つに大別して考察されているが，いわゆる電源システムの安定性の問題は，環境信頼性向上問題における基本的な課題である．いわば，コンピュータ・システムが安定した稼動を継続するためには，その使用環境が十分整備された状況のもとで，保全・運用に関する各種の高信頼化技術が適用される必要があり，結果としてシステムの使用信頼性が向上するものと考えられる．

わが国の商用電力の質は，諸外国に比べ極めて高いレベルにあるが，雷発生期における瞬断や瞬時電圧低下は頻繁に発生しており，また比較的長時間の一般停電も頻度は少ないが発生しているのが現状である[1),2)]．このため，通常の主要コンピュータ・システムにおける供給電源は，一般商用電源の障害時に対応して，バッテリーや自家用発電機などの予備電源を確保することにより，その安定性を保障している現況にある．

文献6)において，著者らは，電源システムに関して定常アベイラビリティを尺度とした信頼性評価を行った．そこでは，ある条件のもとで，平均5秒以内の瞬時障害ならば CVCF など最小容量のバッテリーを確保すれば，定常アンアベイラビリティを 10^{-9} 以下に保障することが可能であることがわかった．しかし，比較的長時間の一般停電に関しては，単に定常アベイラビリティのみでなく，期待費用を含めた予備電源の経済的評価が不可欠であるとの結論を得た．

ここでは，電源システムにおける一般停電に関して信頼性と経済性の問題を考察する．すなわち，コンピュータ・システムの電源が，通常の商用電源の障害時に，バッテリーおよび予備発電機によってバックアップされる信頼性モデルを設定する．そして，コスト有効性[7)]の考え方を導入してコスト／アベイラビリティ比を求め，それを最小にする最適なバッテリーの大きさを議論し，数値例による考察と評価を行う．

2. 電源システムのモデルと解析

モデルの概要を図1に示す．

商用電源は，一般分布 $F(t)$（平均 $1/\lambda$）に従って障害が発生し，その障害は指数分布 $G(t)=1-\exp(-\mu t)$ に従って復旧するものとする．

（1） 商用電源に障害が発生した場合

（i） ただちに，バッテリーによって一定時間（ミッションタイム：a）のバックアップを行う．このミッションタイムは，商用電源の瞬時障害に対するバックアップ時間に対応し，いわば，予備発電機のウォームアップ時間と解釈することもできる．

（ii） もし，商用電源が a 未満に復旧した場合は，ただちに商用電源に切り替わる．

† Reliability Evaluations of Batteries for a Power Supply System of a Computer by KAZUMI YASUI, TOSHIO NAKAGAWA and MITSUO MOTOORI (Department of Industrial Engineering, Aichi Institute of Technology).

†† 愛知工業大学経営工学科

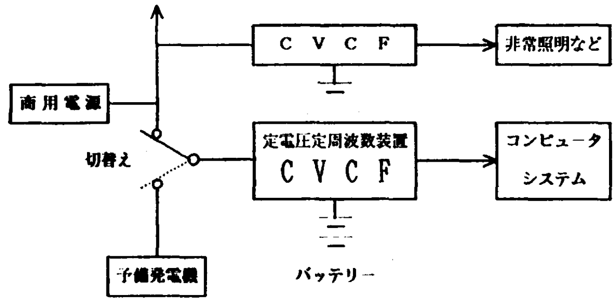


図 1 電源システムの概要
Fig. 1 Outline of a power supply system.

(iii) もし，商用電源が復旧せずにバッテリーのハードウェア障害（例えば，突発的な重負荷による過放電や偶発故障など）が a 未満で発生するとシステム故障となる．この場合のバッテリーの障害発生時間分布を $B_1(t)=1-\exp(-\beta_1 t)$ とする．

(2) バッテリーによるバックアップ

(i) バッテリーによるバックアップがミッションタイム a に達したときは，引き続いて一定時間 l のバックアップを行う．この時間は，商用電源障害時のバックアップ方策に関して，バッテリーのみによる方法と，バッテリーと予備発電機との併用方策とを比較検討するために設定する時間であり，いわば，$a+l$ は商用電源の一般停電障害に対応するバックアップ時間である．

(ii) もし，商用電源が $a+l$ 未満に復旧した場合は，ただちに商用電源に切り替わる．

(iii) もし，商用電源が復旧せずに一定時間 $a+l$ に達するか，または，$a+l$ 未満にバッテリーのハードウェア障害が発生した場合は，ただちに予備発電機への切替えを行う．この場合，切替えは瞬時で確率 p で成功するものとし，逆に確率 $1-p$ で切替えが失敗してシステム故障になるものとする．

(3) 予備発電機によるバックアップ

(i) もし，商用電源が復旧した場合は，ただちに商用電源に切り替える．この場合，切替えは瞬時で確率 p で成功し，失敗した場合はシステム故障となる．

(ii) もし，商用電源が復旧せず，予備発電機に障害が発生するとシステム故障となる．この場合の予備発電機の障害発生時間分布を，$B_2(t)=1-\exp(-\beta_2 t)$ とする．

(4) システム故障後の復旧

システム故障となった場合は，商用電源の回復を待って初期状態へ復旧するものとする．

以上の仮定のもとで，システムの挙動を表す各状態を次のように定義する．

状態 0：商用電源正常．

状態 1：バッテリーによるバックアップ開始（ミッションタイム a）．

状態 2：バッテリーによるバックアップ継続（l 時間）．

状態 3：予備発電機によるバックアップ開始．

状態 4：システム故障．

このように定義された各状態はマルコフ再生過程[5]を形成し，各状態とも再生点となる．

マルコフ再生過程における 1 ステップ推移確率時間分布を $Q_{ij}(t)$ $(i,j=0,1,2,3,4)$ とし，そのラプラス・スティルチェス (LS) 変換を $q_{ij}(s)$ とする．そのとき，

$$q_{01}(s)=f(s), \tag{1}$$

$$q_{10}(s)=\frac{\mu}{s+\mu+\beta_1}[1-e^{-(s+\mu+\beta_1)a}], \tag{2}$$

$$q_{12}(s)=e^{-(s+\mu+\beta_1)a}, \tag{3}$$

$$q_{14}(s)=\frac{\beta_1}{s+\mu+\beta_1}[1-e^{-(s+\mu+\beta_1)a}], \tag{4}$$

$$q_{20}(s)=\frac{\mu}{s+\mu+\beta_1}[1-e^{-(s+\mu+\beta_1)l}], \tag{5}$$

$$q_{23}(s)=p\left\{e^{-(s+\mu+\beta_1)l}+\frac{\beta_1}{s+\mu+\beta_1}[1-e^{-(s+\mu+\beta_1)l}]\right\}, \tag{6}$$

$$q_{24}(s)=(1-p)\left\{e^{-(s+\mu+\beta_1)l}+\frac{\beta_1}{s+\mu+\beta_1}[1-e^{-(s+\mu+\beta_1)l}]\right\}, \tag{7}$$

$$q_{30}(s)=\frac{p\mu}{s+\mu+\beta_2}, \tag{8}$$

$$q_{34}(s)=\frac{1}{s+\mu+\beta_2}[(1-p)\mu+\beta_2], \tag{9}$$

$$q_{40}(s)=\frac{\mu}{s+\mu}, \tag{10}$$

を得る．ここで，一般に $f(s)\equiv\int_0^\infty \exp(-st)dF(t)$ とおく．

さて，(1)～(10)式を用いてシステムの定常アベイラビリティを求めよう．システムが，時刻 $t=0$ で状態 0 から出発したとき，時刻 t で状態 4 にある確率を $P_{04}(t)$ とし，その LS 変換を $p_{04}(s)$ とすると，

$$p_{04}(s)=[q_{01}(s)q_{12}(s)q_{23}(s)q_{34}(s)+q_{01}(s)q_{12}(s)q_{24}(s)$$

$$+q_{01}(s)q_{14}(s)][1-q_{40}(s)]/[1-h_{00}(s)], \tag{11}$$

を得る．ここで，

$$\begin{aligned}h_{00}(s)&\\ &=q_{01}(s)\{q_{10}(s)+q_{12}(s)q_{20}(s)+q_{12}(s)q_{23}(s)q_{30}(s)\\ &\quad+[q_{12}(s)q_{24}(s)+q_{12}(s)q_{23}(s)q_{34}(s)+q_{14}(s)]\\ &\quad\cdot q_{40}(s)\},\end{aligned} \tag{12}$$

であり，状態0から初めて状態0に戻る再帰時間分布の LS 変換形を示している．

システムが定常状態で状態4にある確率 P_4 は，

$$\begin{aligned}P_4&\equiv\lim_{t\to\infty}P_{04}(t)=\lim_{s\to 0}p_{04}(s)\\ &=\frac{1}{l_{00}}\left\{\frac{1}{\mu}-\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}]\right.\\ &\quad\left.-\frac{p^2}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right]\right\},\end{aligned} \tag{13}$$

である．ここで，

$$\begin{aligned}l_{00}&=\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu}+\frac{p(1-p)}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\\ &\quad\cdot\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right],\end{aligned} \tag{14}$$

であり，状態0における平均再帰時間を示す．なお，定常アベイラビリティは状態4がシステム故障であるから，$1-P_4$ で与えられる．

同様な方法によって，システムが単位時間あたりに状態 $j\,(j=1,2,3,4)$ を訪問する平均回数 M_j を次のように求めることができる．

$$M_1=\frac{1}{l_{00}}, \tag{15}$$

$$M_2=\frac{1}{l_{00}}e^{-(\mu+\beta_1)a}, \tag{16}$$

$$M_3=\frac{1}{l_{00}}pe^{-(\mu+\beta_1)a}\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right], \tag{17}$$

$$\begin{aligned}M_4&=\frac{1}{l_{00}}\left\{\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}\right.\\ &\quad\left.-\frac{p^2\mu}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right]\right\}.\end{aligned} \tag{18}$$

ここに，M_1 は商用電源の平均故障回数，すなわち，バッテリーのミッションタイム以内における平均バックアップ回数を表し，M_2, M_3 は，それぞれ，バッテリーおよび予備発電機によるバックアップ回数を表す．また，M_4 は平均システム故障回数を示す．

3. 最適バッテリー容量

商用電源障害時における最適なバッテリー容量について考えよう．ここでは，コスト有効性の考え方を用いた最適方策を議論する．すなわち，コスト C を期待費用，有効性 E を定常アベイラビリティと仮定し，C/E 比≡コスト／アベイラビリティ比 $A(l)$ を求め，$A(l)$ を最小にする最適方策を考察する．

まず，期待費用 $C(l)$ を求めよう．バッテリーによるバックアップ費用については，いわば“放電”に伴う費用と事後の“充電”に要する費用を考慮する必要があり，“充電”に要する費用はバックアップ時間に対して割高に増大すると考えられるため，ミッションタイム以内の場合は c_1，以外のバックアップ費用を c_2 として，区別して設定する．すなわち，1回のバックアップに要する費用を，それぞれ，c_1a と c_2l とする．ここで，バッテリーの使用時間でなく使用回数を用いるのは，バッテリーの容量増加によるバックアップ方策に重点をおき，いわばバッテリーによるバックアップ費用に関して，より安全側の評価を意図するためである．また，予備発電機による1回のバックアップ費用を c_3 とし，システム故障に伴う損失費用を1回あたり c_4 と仮定する．そのとき，単位時間あたりの期待費用 $C(l)$ は，(15)～(18)式を用いて次式で与えられる．

$$C(l)\equiv c_1aM_1+c_2lM_2+c_3M_3+c_4M_4. \tag{19}$$

コスト／アベイラビリティ比 $A(l)$ は，(13)式と(19)式を用いて，

$$\begin{aligned}A(l)&=C(l)/(1-P_4)\\ &=\left\{c_1a+c_2le^{-(\mu+\beta_1)a}+pC_Ke^{-(\mu+\beta_1)a}\right.\\ &\quad\cdot\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right]\\ &\quad\left.+c_4\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}\right]\right\}\\ &\quad\Big/\left\{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}]\right.\\ &\quad+\frac{p}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\\ &\quad\left.\cdot\left[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right]\right\},\end{aligned} \tag{20}$$

で与えられる．ここで，$C_K\equiv c_3-c_4[p\mu/(\mu+\beta_2)]$ とおく．

最初に，商用電源障害時のバックアップ方策として予備発電機を考慮せず，バッテリーのみによってバッ

クアップする場合を考察しよう．(20)式において，$c_3=0$, $\beta_2=\infty$ とおくことによって，

$$A_1(l)=\Big\{c_1a+c_2le^{-(\mu+\beta_1)a}+c_4\Big[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}\Big]\Big\}\Big/\Big\{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)}]\Big\}, \quad (21)$$

を得る．(21)式を l で微分して零とおくと，次式が得られる．

$$\Big(\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}\Big)e^{-(\mu+\beta_1)l}-\Big(l+\frac{1}{\mu+\beta_1}\Big)e^{-(\mu+\beta_1)a}=\frac{1}{c_2}\Big(c_1a+c_4\frac{\lambda+\mu}{\lambda}\Big). \quad (22)$$

(22)式の左辺を $L_1(l)$ とおくと，$L_1(l)$ は明らかに l の単調増加関数である．よって，次のような最適方策を得る．

(i) もし，$L_1(0)<[c_1a+c_4(\lambda+\mu)/\lambda]/c_2$, すなわち，

$$\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]<\frac{1}{c_2}\Big(c_1a+c_4\frac{\lambda+\mu}{\lambda}\Big),$$

ならば，(22)式を満たす有限で唯一の l_1^* が存在し，$A_1(l)$ を最小にする．

(ii) もし，$L_1(0)\geq[c_1a+c_4(\lambda+\mu)/\lambda]/c_2$ ならば，$l_1^*=0$ である．

次に，バッテリーと予備発電機の併用方策によって商用電源をバックアップする場合を考察する．(20)式で $l=0$ とおくと，

$$A(0)=\Big\{c_1a+c_3pe^{-(\mu+\beta_1)a}+c_4\Big[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)a}-\frac{p^2\mu}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\Big]\Big\}\Big/\Big\{\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]+\frac{p}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\Big\}, \quad (23)$$

を得る．これは，商用電源の障害時にまずバッテリーによってミッションタイム a 時間だけバックアップを行い，それ以降は予備発電機によってバックアップを行うモデルに相当する．

さて，(20)式を l で微分して零とおくことによって，

$$\Big[\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}+\frac{p\beta_1}{(\mu+\beta_1)(\mu+\beta_2)}e^{-(\mu+\beta_1)a}\Big]e^{(\mu+\beta_1)l}-\Big(l+\frac{1}{\mu+\beta_1}\Big)\Big(1-\frac{p\mu}{\mu+\beta_2}\Big)e^{-(\mu+\beta_1)a}=D. \quad (24)$$

ここで，

$$D\equiv\frac{1}{c_2}\Big\{c_1a\Big(1-\frac{p\mu}{\mu+\beta_2}\Big)+\Big(1+\frac{\mu}{\lambda}\Big)(pC_K+c_4)-\frac{p\beta_1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]\Big(C_K+\frac{c_4\mu}{\mu+\beta_2}\Big)\Big\}.$$

(24)式の左辺を $L_2(l)$ とおくと，

$$L_2(0)=\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]+\frac{p}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}, \quad (25)$$

$$L_2(\infty)=\infty, \quad (26)$$

となる．さらに，$L_2(l)$ を l で微分すると，

$$L'_2(l)=\frac{\lambda+\mu+\beta_1}{\lambda}e^{(\mu+\beta_1)l}-e^{-(\mu+\beta_1)a}+\frac{p}{\mu+\beta_2}[\mu+\beta_1e^{(\mu+\beta_1)l}]e^{-(\mu+\beta_1)a}>0, \quad (27)$$

となり，$L_2(l)$ は l の単調増加関数である．よって，次のような最適方策を得る．

(iii) もし，$L_2(0)<D$, すなわち，

$$\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]+\frac{p}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}<\frac{1}{c_2}\Big\{c_1a\Big(1-\frac{p\mu}{\mu+\beta_2}\Big)+\Big(1+\frac{\mu}{\lambda}\Big)(pC_K+c_4)-\frac{p\beta_1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]\Big(C_K+\frac{c_4\mu}{\mu+\beta_2}\Big)\Big\}, \quad (28)$$

ならば，(24)式を満たす有限で唯一の l^* が存在して $A(l)$ を最小にする．

(iv) もし，$L_2(0)\geq D$ ならば，$l^*=0$ である．

なお，c_1〜c_4 をそれぞれ単位時間あたりのバックアップ費用とすると，(19)式の $C(l)$ は，状態 j ($j=1,2,3,4$) における定常確率 P_j を用いて，

$$C(l)=\sum_{j=1}^{4}c_jP_j=\frac{1}{l_{00}}\Big\{c_1\frac{1}{\mu+\beta_1}[1-e^{-(\mu+\beta_1)a}]+c_2\frac{1}{\mu+\beta_1}e^{(\mu+\beta_1)a}[1-e^{-(\mu+\beta_1)l}]+c_3\frac{p}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\cdot\Big[\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\Big]$$

$$+c_4\left[\frac{1}{\mu}-\frac{1}{\mu+\beta_1}(1-e^{-(\mu+\beta_1)(a+l)})-\frac{p^2}{\mu+\beta_2}e^{-(\mu+\beta_1)a}\cdot\left(\frac{\beta_1}{\mu+\beta_1}+\frac{\mu}{\mu+\beta_1}e^{-(\mu+\beta_1)l}\right)\right]\Bigg\}, \qquad (29)$$

となり，同様な方法によって最適方策を求めることができる．

4. 数値例と考察

前章で求めた最適方策について，具体的な数値を求めてみよう．わが国の近年における過去5カ年（1982年〜1986年）の実績によれば，商用電源における障害状況は，平均でおよそ10回／年の瞬時停電（平均復旧時間0.1〜2秒）と，約0.5回／年の一般停電（平均復旧時間30分）が発生している[1),2)]．瞬時停電については，バッテリーによるミッションタイム以内のバックアップで十分と考えられる[6)]ので，ここでは一般停電におけるバックアップ方策の数値例を求めて考察を行うこととしよう．

上述のような実績を用いて，一般商用電源の障害が平均0.5回／年の割合で発生するものとし，平均障害発生間隔を $1/\lambda=17,520$ 時間，平均復旧時間については $1/\mu=5$〜30分（可変）とする．また，バッテリーおよび予備発電機の平均故障間隔を，それぞれ $1/\beta_1=8,760$ 時間，$1/\beta_2=240$ 時間とし，バッテリーのミッションタイムを $a=5$ 分とする．なお，バッテリーから予備発電機，予備発電機から商用電源への切替え成功確率を，$p=0.9$ と仮定する．さらに，期待費用を求めるためのパラメータとして，ミッションタイム a に対応するバックアップ費用をシステムの単位費用として $c_1=1$ とおき，a を超えてさらに引き続いて行うバックアップ時間 l に対応する費用を $c_2/c_1=2,3,5$ とする．予備発電機による1回のバックアップ費用を $c_3/c_1=400$〜500（可変）とし，システム故障に伴う損失費用を $c_4/c_1=500,700,1000$ と仮定する．

以上のような仮定のもとで，**表1**には，予備発電機を考慮せずバッテリーのみによってバックアップを行う場合の，コスト／アベイラビリティ比 $A_1(l)$ を最小にする最適なバッテリー容量 l_1^* の数値例を示す．

この数値例によれば，バッテリーのみによって商用電源のバックアップを行う場合の最適バッテリー容量 l_1^* は，商用電源の平均復旧時間 $1/\mu$ の増大と，システム故障に伴う損失費用 c_4/c_1 の増大に伴ってともに大きくなり，また，同一の c_4/c_1 のもとで，l に対応するバックアップ費用 c_2/c_1 の増大に伴って小さくなることを示している．例えば，$1/\mu=30$ 分，$c_4/c_1=500$ のとき，$c_2/c_1=2$ とすると，l_1^* は約64分であり，ミッションタイム $a=5$ 分を含めて，およそ70分間の放電能力をもつバッテリーを設置する方策が最適であることがわかる．

表2には，$1/\mu=30$ 分のとき，バッテリーと予備発電機の併用によってバックアップを行う場合において，コスト／アベイラビリティ比 $A(l)$ を最小にする最適なバッテリー容量 l^* の数値例を示す．

この数値例による最適バッテリー容量 l^* は，予備

表1 $A_1(l)$ を最小にする最適バッテリー容量 l_1^* の数値例
Table 1 Numerical values of optimal capacities l_1^* of batteries to minimize $A_1(l)$.

c_4/c_1	c_2/c_1	$1/\mu$ (分) 5		10		30	
		l_1^*	$A(l_1^*)\times10^4$	l_1^*	$A(l_1^*)\times10^4$	l_1^*	$A(l_1^*)\times10^3$
500	2	19.6	0.21951	32.2	0.53449	63.6	0.15553
	3	17.5	0.28417	28.1	0.70772	51.5	0.20151
	5	15.0	0.39719	23.0	1.00040	36.1	0.27097
700	2	21.2	0.23130	35.6	0.57335	73.7	0.17179
	3	19.2	0.30185	31.5	0.76599	61.5	0.22591
	5	16.7	0.42664	26.4	1.09750	46.2	0.31162
1000	2	23.0	0.24381	39.1	0.61456	84.4	0.18904
	3	21.0	0.32060	35.1	0.82779	72.2	0.25177
	5	18.4	0.45788	30.0	1.20045	56.9	0.35472

表2 $1/\mu=30$ のとき，$A(l)$ を最小にする最適バッテリー容量 l^* の数値例
Table 2 Numerical values of optimal capacities l^* of batteries to minimize $A(l)$ when $1/\mu=30$ minutes.

c_4/c_1	c_2/c_1	c_3/c_1 400		450		500	
		l^*	$A(l^*)\times10^3$	l^*	$A(l^*)\times10^3$	l^*	$A(l^*)\times10^3$
500	2	60.8	0.15106	63.7	0.15561	66.2	0.15977
	3	48.7	0.19481	51.5	0.20164	54.1	0.20787
	5	33.3	0.25980	36.2	0.27117	38.7	0.28157
700	2	63.3	0.15496	65.9	0.15917	68.3	0.16305
	3	51.1	0.20067	53.7	0.20698	56.1	0.21279
	5	35.8	0.26956	38.4	0.28009	40.8	0.28977
1000	2	66.6	0.16028	68.9	0.16407	71.1	0.16759
	3	54.4	0.20865	56.7	0.21433	58.9	0.21960
	5	39.1	0.28286	41.4	0.29233	43.6	0.30111

発電機によるバックアップ費用 c_3/c_1 の増大と c_4/c_1 の増大に伴ってともに大きくなり，同一の c_4/c_1 のもとで，c_2/c_1 の増大に伴って小さくなる．例えば，$c_4/c_1=500$, $c_2/c_1=2$ のとき，$c_3/c_1=450$ とすると l^* は約 64 分となり，表1と同様に，およそ 70 分間の放電能力をもつバッテリーと，予備発電機との併用方策が最適であることを示している．

ところで，表1と表2におけるコスト／アベイラビリティ比を比較することによって，予備発電機によるバックアップ費用 c_3/c_1 が小さい場合には，バッテリーと予備発電機との併用方策が有利であり，逆に，c_3/c_1 が大きい場合には，バッテリーのみによる方策が有利であることがわかる．例えば，$c_4/c_1=500$ と仮定すると，およそ $c_3/c_1=450$ のとき，両者のコスト/アベイラビリティ比が大略等しくなる．いわば，$c_3/c_1<450$ ではバッテリーと予備発電機との併用方策が，$c_3/c_1\geq 450$ ではバッテリーのみによる方策が，それぞれ，経済的・信頼性的に有利であることが示される．さらに，システム故障に伴う損失費用が大きくなるに伴って，バッテリーのみによる方策よりはバッテリーと予備発電機との併用方策の方が有利になっていく．すなわち，上述のような数値計算パラメータの仮定のもとで，システム故障に伴う損失費用と予備発電機によるバックアップ費用との比 c_4/c_3 が大略 1.1 以下ならば，バッテリーのみによる方策が有利となり，それ以外の場合は，バッテリーと予備発電機との併用方策が経済的・信頼性的に得策であるといえるであろう．なお，このような傾向は，商用電源の復旧時間が $1/\mu=5\sim30$ 分のすべての場合について示すことができる．

5. おわりに

コンピュータ・システムにおける使用信頼性向上問題の基本的課題の1つとして，電源システムの信頼性の問題を考察した．実際面において，重要なメインフレームにおけるシステム用電源が，商用電源の瞬時停電や一般停電に対して，バッテリーや予備発電機を設置している現状に着目し，このような予備電源の大きさやバックアップ方策に関して，コスト／アベイラビリティ比を評価尺度とした最適方策を求めて議論し，その有効性を考察した．

商用電源の平均的な一般停電に対するバックアップ方策について，一応の評価が得られた．すなわち，ある数値計算パラメータの仮定のもとで，システム故障に伴う損失費用と予備発電機によるバックアップ費用との比 c_4/c_3 が，およそ 1.1 以下ならば，バッテリーのみによるバックアップ方策が有利であり，それ以外の場合は，バッテリーと予備発電機による併用方策が経済的・信頼性的に得策であることが示された．実際に適用するバックアップ方策としては，コンピュータ・システムとしての総合的視点による考察も重要であり，いわば，経済性と信頼性のどちらに重点をおくかにより，上述の費用比を選択すべきであろう．

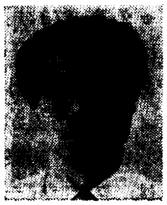
ここでは，主に一般停電に関してのみ数値例による考察を行ったが，実際，CVCF などを設置した電源供給システムでは，商用電源の瞬時停電に対してのシステム障害はほとんど発生していないのが現状であり[1]，バッテリーによるミッションタイム以内のバックアップによって十分対応できる[6] ものと考えられる．

コンピュータ・システムにおける電源システムの安定性の問題は，他の使用環境の問題とともに基本的かつ重要な課題であり，この方面に対する多くの研究が期待される．

参考文献

1) 定由征次：無停電電源装置 (UPS) 導入実戦ガイド，284 p.，電気書院 (1989).
2) 資源エネルギー庁公益事業部技術課（編）：昭和61年度電気事故統計，資源エネルギー庁 (1987).
3) 情報処理学会（編）：新版情報処理ハンドブック，1166 p.，オーム社 (1982).
4) 当麻喜弘（監修），向殿政男（編）：コンピュータシステムの高信頼化技術入門，249 p.，日本規格協会 (1988).
5) Nakagawa, T. and Osaki S.: Stochastic Behavior of a Two-unit Standby Redundant System, *Canadian Journal of Operational Research and Information Processing*, Vol. 12, No. 1, pp. 66-70 (1974).
6) 安井一民，中川覃夫，本告光男：予備発電機とバッテリーをもつ電源システムの信頼性評価，情報処理学会論文誌，Vol. 31, No. 4, pp. 618-623 (1990).
7) 塩見　弘：コンピュータ・リライアビリティ，320 p.，昭晃堂 (1974).

（平成2年9月 5 日受付）
（平成3年1月 11 日採録）



安井　一民（正会員）

昭和11年生．昭和49年名城大学理工学部数学科卒業．工学博士．昭和30年中部電力(株)入社．情報処理システムの分析・設計・開発に従事．平成元年愛知工業大学経営工学科助教授，現在に至る．計算機システムの信頼性の研究に従事．電子情報通信学会，日本 OR 学会各会員．

中川　覃夫（正会員）

昭和17年生．昭和42年名古屋工業大学工学研究科計測工学専攻修士課程修了．工学博士．昭和42年名城大学理工学部助手，昭和53年同大学助教授．昭和63年愛知工業大学経営工学科教授，現在に至る．信頼性理論および計算機システムの信頼性の研究に従事．電子情報通信学会，日本 OR 学会，日本経営工学会各会員．

本告　光男（正会員）

大正14年生．昭和22年多賀工業専門学校電気科卒業．工学博士．昭和22年中部配電(株)（現中部電力(株)）入社．発変電関係業務，OR の開発・応用，情報処理システムの分析・設計・開発・管理に従事．昭和60年愛知工業大学経営工学科教授，現在に至る．OR の応用に関する研究に従事．電気学会，電子情報通信学会，日本 OR 学会各会員．