広域分散制御システムの一信頼性評価手法

正 員 芹 澤 善 積 (電力中研)

非会員 大 場 英 二 (電力中研)

A Reliability Evaluation Method for Wide-area Distributed Control System

Yoshizumi Serizawa, Member, Eiji Ohba, Non-member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

A reliability evaluation method has been proposed for wide-area distributed control system which consists of controller subsystems and a wide-area telecommunication network connecting those subsystems. As for a reliability evaluation measure, functional availability was adopted to take account both of reliability of controller and telecommunication network and their relationship with control function. Considering wide-area power system control, methods for calculating functional availability were provided for centralized, hierarchical and autonomous decentralized control systems concerning local control and global coordination functions. The results of functional availability evaluation for those various types of control systems characterized their essential point of system structure and reliability. By using the proposed method, unified reliability analysis for both centralized and decentralized systems can be quantitatively performed with respect to the number of hierarchical control layers, functional weight of each layer, and coordination and self-regulation functions of controllers. The method can be also basically applied to manually operated control systems.

キーワード：信頼性、分散制御、階層制御、集中制御、計算機ネットワーク、広域ネットワーク

1. ま え が き

電力系統や交通システムなどの制御は、最初は装置ごとに分散的に行われていたが、複雑・高度な要求に応えるべく統合化や集中化が図られてきた。しかし、システムがますます大規模・複雑化し、制御内容が多様化・高度化するにつれ、多くの処理をシステムの特定期間に集中させることによるボトルネックが顕在化してきた。すなわち、システムの開発や運用などの段階において、システム構築の柔軟性の欠如や過度な高速処理性能の要求といった問題が出てきている。また、システムの大規模化と共に、その信頼性が制御内容に与える影響も大きくなっていると同時に、高信頼化のコストも増大している。このため、近年、これら問題の解決策として、処理の分散化を目指した分散計算機制御システムが期待されている⁽¹⁾。しかし、現状

においては、必ずしもすべてが分散化されればよいわけでもなく、集中方式がいまだに適していると思われる制御形態もあり得る。例えば、電力系統制御においては、地域的に分散する発電所の発電量を経済的に配分する制御は、1箇所で集中して行ったほうが効率的であろう。要は、制御内容に応じて、制御システムの処理性能、信頼性、コストなどを勘案しつつ、集中方式と分散方式をいかに使い分けるかが重要な課題である。

分散(計算機)制御システムは、機能、地理的広がり、協調性などの観点から種々のアーキテクチャに分類され⁽²⁾、幾つかの優れた分散制御方式も提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。本論文で扱う広域分散制御システムは、地理的に分散する制御用サブシステムが通信ネットワークで連係されているシステムであり、その形態として集中型、階層型、水平分散型(あるいは自律分散型)な

どが考えられる⁽²⁾。各サブシステムは、制御用計算機および通信用インタフェースなどからなるが、制御用計算機の代わりに人間系が介在する場合や、システム運用者そのもの場合もある。

社会的インフラストラクチャとしての性格が強い大規模・広域分散制御システムの計画においては、システム障害時の影響が大きいことから、その信頼性評価と高信頼化対策が重要な課題となる。分散制御システムの信頼性評価については、階層システムの評価⁽⁵⁾や自律分散システムの評価⁽⁶⁾などがなされてきた。しかし、広域分散制御システムで問題となる広域通信網の信頼性、あるいは各種制御用サブシステムと通信系との機能面および信頼度面での関係などを考慮した評価は、必ずしも十分なされていなかった。また、分散制御システムはリスク分散の観点から望ましいといった定性的議論はなされてきたが、集中システムと分散システムを統一的かつ定量的に比較した議論は、これまで少なかった。

本論文では、まず制御システムの機能を重視した信頼性評価尺度について言及し、本検討で採用する評価尺度である機能稼働率を定義する。次に、各種広域分散制御システムのモデル構成を示し、機能稼働率の具体的な計算法を示す。最後に、各システムの機能稼働率を比較すると共に、システム構成上の留意点を述べる。

2. 広域分散制御システムの信頼性評価尺度

図1に制御対象とそれを制御する広域分散制御システムの基本構成を示す。制御システムは、サブシステム（制御用計算機あるいは運用者）と広域通信回線（網）により構成され、制御目的と制御対象からの監視情報をもとに制御内容を決定し、制御対象に制御情報を出力する。制御システムの信頼性評価にあたっては、システムの単なる故障率や稼働率だけでなく、制御対象に対する制御機能も考慮することにより、異なる制御形態に対しても統一的な比較が容易になる。すなわち、評価尺度としては、サブシステムの連係度合による制御機能の達成度とシステム信頼度が考慮されなければならない。計算機システムの信頼性評価尺度としては、計算機の処理量や機能と信頼性を結び付けたものが幾つか提案されている^{(6)~(8)}。階層制御システムについては、システム内で発生した情報がそれぞれの目的地にどの程度到達しうるかを表す情報到達度が用いられた⁽⁹⁾。本論文では、情報の伝送とサブシステム間の連係、制御機能の実現度合などの観点から、すでに提案されている機能稼働率⁽⁶⁾の概念を採

図1 広域分散制御システムの基本構成
 Fig.1. Basic structure of wide-area distributed control system.

用し、各種広域分散制御システムに適用可能なように拡張する。なお、これは情報到達度の概念をも含むことができるものである。

機能稼働率は、システム全体が健全な場合のシステム機能の発揮度合を1として、定常時にある確率をもって出現するシステム障害状態におけるシステム機能の発揮度合を、すべてのシステム状態について平均したものと定義する。ここで、システム機能の発揮度合をシステムの機能達成度と呼ぶ。従って、機能稼働率は次式で表される。

$$R^F = \sum_i R_i \times J_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 i : システムのとりうる状態、 R_i : その状態の起こる確率、 J_i : そのときの機能達成度

機能達成度は制御システムから制御対象に出力される有効な制御情報（有効出力）の量により評価できる。すなわち、機能達成度を有効出力の出力割合として、次式で表す。

$$J_i = \frac{S_i}{S_0} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 S_0 : 全システムが健全な場合の全有効出力の和、 S_i : 状態 i における出力可能な有効出力の和

なお、ここでは、有効出力により制御対象は忠実に制御されるものと仮定していることになるが、実際には有効出力に対する制御対象の応答まで考慮する必要がある。有効出力は、単にサブシステムの稼働・不稼働のみならず、サブシステム間の連係度合にも関係する。各サブシステムは、制御対象からの情報をもとに、あらかじめ定められている制御目的に対し、サブシステム間の協調などをとって、全系としての判断・意思決定、個々の制御方策の決定などを行い、制御対象に有効出力が出力される。有効出力の出力にあたっては、制御対象からの情報の伝達、判断、制御内容の

伝達と出力など、関係するサブシステムや情報伝送系などすべての要素の稼動状態と結合状態が関係する。

以下では、広域分散制御システムの代表的なものとして、電力系統制御システム⁽⁹⁾を想定し、その概念的なモデル構成を示し、上記の機能稼動率を適用することにより、システム信頼性の評価と比較を行う。

3. 広域分散制御システムの構成例

〈3・1〉モデル制御システム モデルとする電力系統用の広域分散制御システムにおいて、制御用サブシステムは中央あるいは地方の制御所や電気所（発電所）であり、実際には、それらに収容されている制御用計算機や系統運用者である。サブシステム間は、光ファイバやマイクロ波無線回線などで結ばれている。各種制御形態を統一的に比較するため、本論文では、図2に示すように制御領域が幾つかのサブ領域に分割でき（分割数： M ）、それらのサブ領域が、例えば連系送電線などにより電氣的に相互に結合しているような制御対象を考える。このような場合の制御内容としては、各サブ領域内のローカル制御とそれらの間の協調をとる全系協調制御に分けられる。ローカル制御では、自領域内の制御対象に最適の制御方策を決め、その内容を情報 l として協調制御部に送る。協調制御部では、各ローカル制御部から送られてきた制御方策の協調を取り、その情報 u を各ローカル制御に送り返す。これらの手続きを何回か繰返すことにより、全系として最適な制御が行われる。このような制御は、実際にも分割型線形計画問題として、分割された電力系統の最適負荷配分制御などに見ることができる⁽¹⁰⁾。

〈3・2〉広域分散制御システムの形態 上記のモデル制御システムに対し、本検討では集中、階層、水平分散（自律分散）の各制御形態を考える。その具体

図2 モデル制御対象と制御機能
Fig. 2. Model of control object and function.

的な制御所や電気所と通信網の構成を示すと、図3のようになる。(a)図は集中形態であり、全系協調(GC)とローカル制御(LC)がすべて中央制御所内に存在する。電気所は、中央制御所からの指令を受けて、自所内の制御（電気所制御：SC）を行う。中央制御所と電気所間は1対 N の双方向通信回線で結ばれる。(b)図は階層形態であり、中央制御所が全系協調を司り、地方制御所は分割領域内のローカル制御を行う。ここで、中央制御所機能を分散し、各地方制御所が地域間協調制御機構をもつと、上位層での水平分散型あるいは自律分散型の形態となる。協調制御機構をもつ地方制御所を自律制御所と呼ぶこととし、この形態を(c)図に示す。各自律制御所が協調制御を行うためには、各制御所間を結ぶ放送方式の情報ネットワークが必要である⁽¹¹⁾。放送方式のネットワークでは、情報送信時に受信先を指定することなく全ノード（制御所）に送信し、その使用については受信先の判断で

GC：全系協調，LC：ローカル制御，SC：電気所制御

図3 広域分散制御システムの各種形態
Fig. 3. Various configurations of wide area distributed control system.

図 4 放送方式のネットワーク構成例
Fig. 4. Broadcast networks.

行うものである。更に、各電気所レベルに全系協調およびローカル制御機構を内在させると、(d)図のような自律電気所型の自律分散形態となる。なお、図中の制御所や電気所、情報伝送路などの各構成要素に付されている記号は、その構成要素の稼働率を表し、後の機能稼働率の計算に使用する。また、 N および N_s はそれぞれ全電気所数および分割領域内の電気所数であり、均等な分割を仮定して $N=M \times N_s$ とする。

自律分散形態で適用される放送方式のネットワークとしては、例えば図 4 に示すような(a)図ループネットワークと、(b)図集中型オンラインデータベースネットワークが考えられる。前者では、ローカルエリアネットワーク(LAN)のように常時は一方に情報が伝送されるが、伝送路に障害があった場合でも、各ノードが自律的にループバックを行い、障害時の影響が局限化される。近年では、専用線化した広域ネットワークに LAN 形態の伝送方式を適用する試みがなされている⁽¹²⁾。また、これをパケット伝送網で構成する方法もあり得る。後者では、オンラインデータベースに伝送された情報は、任意の箇所からアクセスできる。なお、ここでは簡単のため、通信リンクは双方向の物理伝送路と通信機器を含んだものとしている。また、自律的なループバックノードとオンラインデータベースは特殊な機能要素として、通信リンクとは別個の稼働率(A , C_{DB})を付与している。これらのほか、完全グラフ型のメッシュネットワークも考えられるが、今回の検討対象からは除外する。

以下では、集中および階層形態と自律電気所型の自律分散形態の広域分散制御システムについて機能稼働率を計算する。

4. 機能稼働率による広域分散制御システムの信頼性評価⁽¹³⁾

〈4・1〉 集中および階層形態の機能稼働率計算手法
階層形態の機能達成度は、図 5 のように、各階層 k

図 5 階層制御システムの有効出力
Fig. 5. Effective outputs in hierarchical control system.

($k=C, L, S$) から制御対象への有効出力 W_k を考慮することにより求まる。ただし、ある制御所、電気所あるいは伝送路で障害が発生すると、そこから先は有効出力が制御対象に出力されない。従って、階層制御システムの機能達成度 J_{Hi} は次式となる。

$$J_{Hi} = \frac{n_{Ci}W_C + n_{Li}W_L + n_{Si}W_S}{N(W_C + W_L + W_S)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 n_{ki} は各階層 k から出力され、制御対象に到達する有効出力の数である。(3)式を(1)式に代入することにより階層制御システムの機能稼働率 R_{Hi}^f が計算できるが、各階層の制御装置や情報伝送リンクの稼働率がそれぞれ等しい均一なシステムの場合には、機能稼働率は簡単な式で表せ(付録参照)、次式となる。

$$R_{Hi}^f = \frac{C_C L_{H2} C_L L_{H1} C_S W_C + C_L L_{H1} C_S W_L + C_S W_S}{W_C + W_L + W_S} \quad \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、各階層からの有効出力の期待値を足し合せたものとなる。集中形態での機能達成度 J_{Ci} および機能稼働率 R_{Ci}^f も同様に求められる。

〈4・2〉 自律分散形態の機能稼働率計算手法

自律分散形態での機能達成度 J_A は、図 6 のように自主制御機能 J_{As} と協調制御機能 J_{Ac} からなると考えられる。自主制御機能は、階層形態における電気所の制御機能(W_s)に相当し、電気所固有の値である。協調制御機能は、他の電気所と情報を交換することによりその達成度が高まり、一般には交信局数に比例するものと考えられる。すなわち、全電気所数 N に対し、ある電気所が k 箇所の電気所と交信している場合、当該電気所の機能達成度 $J_A(N, k)$ は次式で表せる。

$$J_A(N, k) = J_{As} + J_{Ac}(N, k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

放送方式の通信ネットワークとして、ループネットワークを適用した自律分散制御システムの機能稼働率 R_{AL}^f は、各構成要素が同一の特性と稼働率をもつ均一システムと仮定した場合、次式で表せる。

図 6 自律分散制御システムの有効出力
Fig. 6. Effective outputs in autonomous decentralized control system.

$$R_{AL}^f(N) = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^n R^c(N, n, k) \frac{k J_A(N, k)}{N} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $R^c(N, n, k)$ は、ループネットワークが n ノードでループバック運用されているとき、対応する電気所の n 箇所のうち、 k 箇所が稼働している確率であり、付録にその計算式を示す。また、集中型オンラインデータベースネットワークの場合は、データベースの稼働状況が電気所間の情報交換に大きく影響し、その機能稼働率の計算式を同じく付録に示す。

なお、ループネットワーク型の自律分散制御システムにおいて、電気所の稼働率を $1 (C_s=1)$ 、自主制御機能を 0 とした場合は、通信システムとしての機能稼働率を表すことになり、従来⁽⁶⁾と同様の結果を得る。また、通信ネットワークに障害が全く発生しない場合 ($L=A=C_{DB}=1$) は、ネットワークの形態や電気所数にかかわらず、単独の電気所の稼働率 C_s に等しい値をとる。

〈4・3〉 機能稼働率の計算結果と評価 広域分散制御システムでは、情報伝送路の稼働率がシステム全体の機能稼働率に少なからず影響する場合が考えられる。このため、各種制御システムの機能稼働率計算にあたっては、まず、図 7 に示す制御領域を考え、制御形態に応じた情報伝送路の長さを考えた。すなわち、半径 R の全制御領域に対し電気所密度を ρ とすると、全電気所数 N とは $N=\rho\pi R^2$ の関係がある。ここでは簡単のため、制御所や電気所間の距離 (情報伝送路

図 7 制御領域と情報伝送路長
Fig. 7. Control area and its data transmission path length.

長) は平均距離を用いることとし、例えば集中制御形態では、中央制御所と電気所間の平均距離は $2R/3$ となる。同様に、階層制御形態の場合の平均伝送路長も求まる。ループネットワークによる自律分散制御形態では、一つのリンクの長さは一電気所あたりの専有エリア半径 $r(=R/\sqrt{N})$ の 2 倍と考える。本計算では、ループネットワークの一つのリンクの長さを基準にし、他のネットワーク形態での相対的な伝送路長を算出することとした。

次いで、機能稼働率の計算に直接必要な伝送路不稼働率は、平均伝送路長に比例するものとした。従って、ループネットワークの 1 リンクの稼働率 L_L を定めると、自動的に他の形態での相対的な伝送路稼働率 (L_c, L_{H1}, L_{H2}) が求まる。

また、機能稼働率のベースとなる機能達成度 J の決め方が、実用上は非常に重要である。実際の機能達成度の決め方として、各制御箇所から発せられる情報の重要度、量などを用いたり、各箇所が分担する制御対象の規模や容量を考慮する方法が考えられる。例えば、発電機出力制御の場合、中央の制御箇所では全系の負荷周波数調整を行っており、その制御信号は重要度が非常に高い。また、その管轄する発電所も大規模のものが多く、全系容量に占める割合も非常に高い。一方、地方の制御箇所では、規模のそれほど大きくない水力発電所などを管轄している。また、発電所自体では、負荷変動の大きさが比較的小さなものに対する自動出力調整機能がある。

本計算では上述の例を参考にすると共に、簡単のため、機能達成度の決定に際し次のように考えた。集中あるいは階層制御形態における各階層の有効出力の重みは、各所の管轄する制御対象箇所数に比例するものと考え、 $W_c=1, W_L=1/M, W_S=1/N$ とする。また、自律分散制御形態においては、電気所自体では他の制御形態と同一機能として、自主制御機能 J_{AS} は W_S に等しくした。更に、協調制御機能 J_{AC} は交信電気所数に単純比例するものと考えた。

電気所数が 100 以下の場合について各種形態の広域

図 8 各種制御形態での機能稼働率
Fig.8. Functional availability evaluated for various control systems.

分散制御システムの機能稼働率を計算した結果を図 8 に示す。ここでは、各構成要素の不稼働率について現実的な値を考慮し、ループネットワークのリンクの不稼働率は 10^{-4} 、制御所や電気所の不稼働率は 10^{-3} あるいは 10^{-4} に設定した。計算結果からわかるように、一般に、制御階層数が少ないほど高い機能稼働率が得られるが、システム構成要素のうち最も低い稼働率をもつものの値までしか機能稼働率は上げられない。この結果では、分散システムが集中システムより信頼性の面で必ずしも有利となっていないが、これはパラメータの与え方、すなわち分散化の方策にも依存する。分散化にあたっては、下位層の制御機能の重みを大きくする（あるいは中央の機能のある程度下位層に分担させる）と共に、下位層の稼働率を向上させる必要がある。本計算の集中や階層制御形態では、制御機能の重みの大きい上位層の稼働率が格段に高い場合には、その機能稼働率も高い結果となっている。自律分散制御形態では、自主制御機能を低く、伝送系に依存する協調制御機能を大きくとっていたため、その機能稼働率が低くなっているが、自主制御機能を大きくすれば機能稼働率は改善される。ループネットワークによる自律分散制御形態では、電気所の稼働率が低くても集中制御形態と同等の機能稼働率を得られる場合があるが、オンラインデータベースネットワークでは、データベースの稼働率が問題になる。

なお、集中型システムなどで高信頼性を要求する分野では冗長構成が用いられているが、この場合の機能稼働率を求める際には、その冗長構成によるすべての制御箇所のネットワーク的連結やその有効出力の経路

を考慮する必要がある。

5. あとがき

広域分散制御システムの信頼性評価法について検討した。機能稼働率の概念を用い、提案した各種制御形態に対する計算法を適用することにより、従来定性的に考えられてきた集中システムと分散システムの信頼度面での比較が、統一的かつ定量的に行えるようになった。更に、制御階層数や階層間の制御機能の重み、階層内の協調性や自主制御性などを考慮できるようになり、本評価手法は制御システムの構成を検討するうえでの一つの判断材料を与える手段と考えられる。また、本手法は、システム運用者の運用権限範囲や運用者間の連絡網などを考慮することにより、人間系が介在するシステムにも基本的に適用可能である。

評価結果から判断すると、一般に総合的な制御システム機能稼働率を向上させるには、下位層の稼働率と自主制御性 (W_s, J_{AS}) を向上させ、階層内の連係を強める（協調性を向上させる）ことが重要であろう。自主制御性の向上については、電力系統制御では、例えば、状態推定機能などを向上させることで得られる可能性がある。協調性の向上のためには、階層内の横断的な通信ネットワークの構築はもとより、サブシステム間でハンチングなどを起こさない協調的な制御理論の開発が重要である。

なお、本論文では、制御システムの構成が均一と仮定していたため、機能稼働率の計算式も単純であったが、実際のシステムには、不均一なシステム構成やサブシステム間の結合が複雑な場合が多く、グラフ理論的に効率的な計算アルゴリズムの開発も必要である。また、各制御サブシステムでの機能の重み付けや協調度を定量的に算定する手法も今後の重要な検討課題である。

終りに、本研究を進めるにあたり、貴重な意見および討論をいただいた当所高橋主席専門役、電力システム部 坪井前部長および長尾部長、内田室長、井上室長、谷口室長に感謝いたします。

(平成 3 年 10 月 25 日受付)

文 献

- (1) 田村, 他: 「分散計算機制御システムの構成」, 平 2 電気学会全大, S. 15-1
- (2) 長谷川, 他: 「分散計算機制御システムのアーキテクチャ」, 平 3 電気学会電子・情報・システム部門大会, C-3-1
- (3) 森, 他: 「自律分散概念の提案」, 電学論 C, 104, 303 (昭 59-12)
- (4) 田村, 他: 「知的分散システムのアーキテクチャ」, 同上 C, 108, 393 (昭 63-6)

- (5) 「電力系統における階層制御システム」, 電気学会技報(II部), No. 37 (昭50)
- (6) 森, 他: 「分散システムにおける機能と信頼性の評価」, 計測自動制御学論, 20, 314 (昭59-4)
- (7) M. D. Beaudry: "Performance-related reliability measures for computing systems", *IEEE Trans. Comp.*, C-27, 540 (1978)
- (8) J. F. Meyer: "On evaluating the performability of degradable computing systems", *ibid.*, C-29, 720 (1980)
- (9) 田中, 他: 「電力分野における分散計算制御システム」, 平2電気学会全大, S. 15-2
- (10) 平田, 他: 「自律分散型の過負荷予防監視制御論理」, 電気学会電力技術研資, PE-89-79 (平元)
- (11) 芹澤, 他: 「電力系統の自律分散制御と情報ネットワーク」, 同上, PE-87-135 (昭62)
- (12) 高橋, 他: 「支店内広域伝送ネットワーク(LAN方式)の開発(1)」, 電気学会通信研資, CMN-89-1 (平元)
- (13) 芹澤, 他: 「広域分散制御用データネットワークの信頼性評価」, 平3電気学会電力・エネルギー部門大会, 120

付 録

階層制御システムの機能稼働率は, 次式で計算でき, 簡単な変形により本文(4)式を得る。

$$\begin{aligned}
 R_H^F(N) = & \left\{ C_C \sum_{m=0}^M \binom{M}{m} (L_{H2} C_L)^m \right. \\
 & \times (1 - L_{H2} C_L)^{M-m} \sum_{k=0}^{N_S} \binom{N_S}{k} (L_{H1} C_S)^k \\
 & \times (1 - L_{H1} C_S)^{N_S-k} m k W_C + N_S C_L \sum_{k=0}^{N_S} \\
 & \times \binom{N_S}{k} (L_{H1} C_S)^k (1 - L_{H1} C_S)^{N_S-k} k W_L \\
 & \left. + N_S \sum_{k=0}^{N_S} \binom{N_S}{k} C_S^k (1 - C_S)^{N_S-k} k W_S \right\} / \\
 & \{ N(W_C + W_L + W_S) \} \dots\dots\dots (付1)
 \end{aligned}$$

ループネットワークを適用した自律分散制御形態において, 伝送リンクの上り下り同時に障害が発生するとして, ループネットワークが n ノードでループバック運用されているとき, 対応する電気所の n 箇所のうち, k 箇所が稼働している確率 $R^c(N, n, k)$ は, 次式で表される。

$$\begin{aligned}
 R^c(N, n, k) = & \begin{cases} R^T(N, n) \binom{n}{k} C_S^k (1 - C_S)^{n-k} \\ (1 \leq n \leq N, 0 \leq k \leq n) \\ R^T(N, 0) \binom{1}{k} C_S^k (1 - C_S)^{1-k} \\ (n=0, k=0, 1) \end{cases} \\
 & \dots\dots\dots (付2)
 \end{aligned}$$

ここで, $R^T(N, n)$ はループネットワークの n ノードが連結される確率であり, 次式で表される。

$$\begin{aligned}
 R^T(N, n) = & \begin{cases} A^N \{ N L_L^{N-1} - (N-1) L_L^N \} & (n=N) \\ N A^{N-1} L_L^{N-2} \{ A(1 - L_L)^2 + (1 - A) \} & (n=N-1) \\ N A^n L_L^{n-1} (1 - A L_L)^2 & (1 \leq n \leq N-2) \\ N(1 - A) & (n=0) \end{cases} \\
 & \dots\dots\dots (付3)
 \end{aligned}$$

集中型オンラインデータベースネットワークを適用した自律分散制御形態における機能稼働率は, データベースが稼働しているか否かに分けて考えることにより, 次式で計算できる。

$$\begin{aligned}
 R^F(N) = & C_{DB} \left\{ \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} C_S^n (1 - C_S)^{N-n} \right. \\
 & \times \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} L_{DB}^k (1 - L_{DB})^{n-k} \\
 & \times \left. \frac{k J(N, k) + (n-k) J(N, 1)}{N} \right\} \\
 & + (1 - C_{DB}) \\
 & \times \left\{ \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} C_S^n (1 - C_S)^{N-n} \frac{n J(N, 1)}{N} \right\} \\
 & \dots\dots\dots (付4)
 \end{aligned}$$

芹澤 善 積 (正員)

昭和30年12月29日生。55年3月京大大学院修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。以来, 現在までデジタル無線回線を中心とした電力用通信システム, 電力系統の保護・制御システムに関する研究に従事。現在, 同所主査研究員。この間, 59年より1年間東北電力(株)に出向, および平成元年より1年間テキサス大学客員研究員。電子情報通信学会会員。

大 場 英 二 (非会員)

昭和36年8月19日生。62年3月東北大学大学院修士課程修了。同年(財)電力中央研究所入所。以来, 現在まで電力用通信におけるネットワーク信頼性や通信網管理へのエキスパートシステムの適用に関する研究に従事。現在, 同所担当研究員。