連系位置による系統定数と系統容量の 比例関係の偏りおよびその影響

正員 本田 公韶 (広島工業大学)
 正員 佐々木 博司 (広島大学)
 非会員 長 田 稔 (広島工業大学)
 非会員 真恵原 悟 (広島工業大学)
 正員 横 瀬 宏 (広島工業大学)

**The Bias of the proportional Relation between the Value of Power-Frequency
Characteristic Constant and the Block Capacity depending on Linked Position
of the Block and its Effect**

K.Honda, Member, (Dept. of Electrical Engineering, Hiroshima Institute of Technology)

H.Sasaki, Member, (Dept. of Electrical Engineering, Hiroshima University)

M.Osada, S.Maebara, Non Member, (Hiroshima Institute of Technology)

H.Yokose, Member, (Dept. Electronics Engineering, Hiroshima Institute of Technology)

The demand-supply imbalance on electric power system is absorbed by system frequency variations, before the LFC controls. Since frequency fluctuations are common in all linked blocks, demand-supply imbalance of one block is absorbed by another block too. Demand-supply imbalance arises in another block simultaneously, and is absorbed by the former block. These mutual supports have a direct effect on linkage power fluctuations. The size of this self-regulation is regarded as proportional to the size of frequency fluctuation and the ratio of the former to the latter is nearly proportional to the block capacity. But, at a short period variation range, there is a fear that such a proportional relation will be biased by linkage position. We analyze this point, and reached the following conclusions. First, we can prove the existence of self-regulation bias theoretically and point out that the bias has some effect on linkage power fluctuations at short period variation range. Second, we apply this analytical method to 4 blocks-linked system of Japan, and compare the theoretical value with measured one. The result indicates no correlation among demand fluctuations of those blocks which are presupposed for calculation of the theoretical values; among several blocks is found some ununiformity of the smallest unit size of demand power variations.

キーワード : 需給アンバランス, 自己調整分, 偏り, 連系線電力変動, 周波数変動, 外乱値調整係数

1. はじめに

電力系統内で発生した需給アンバランスは ELD や LFC で調整されるよりも速く、周波数変動を媒介として吸収される。すなわち、周波数変化は発電機側では原動機の調速動作による出力変化を、電動機側では回転速度変化による消費電力変化を伴う。これらの応動は近似的に 1 次遅れで模擬できるが、応動遅れのために残る変動部分は、変動の微分値に比例する加減速パワーとして吸収される。このようにして需給アンバランスのすべてが、吸収されるわけであり、これらを一括して自己調整分と呼ぶことにする。LFC を系統全体で考える場合には、LFC 調整残が自己調整分とイコールなのである。ところで、検討対象を連系系統として扱う場合には、或ブロック内で発生した需給アンバラ

ンスへの対応については、周波数変動を介した隣接ブロックの応援分担を考えることになる。それは当然に連系線を通して行われる。つまりこの場合には、連系線電力変動が隣接ブロックによる応援分担なのである。現実には隣接ブロック内でも需給アンバランスが発生しており、それをこちらのブロックで分担吸収しているわけだから、連系線に載る電力変動は両応援分の重なったものとなる。

ここで、自己調整分は周波数変動に比例し、しかもその比例係数値は系統容量にほぼ比例すると見なされている。自己調整分を構成する電源の規模は系統容量そのものであり、電動機負荷の容量も系統の規模にほぼ比例すると見なし得るからである。しかし、短周期変動帯域においては、ブロックの連系位置によってこの比例関係に偏りが生ずる

のではないかと、との懸念があり、今回、この偏りについて解析を試みてみた。その結果、理論的に偏りの存在を証明し、それが短周期帯域で連系線電力変動の増減に関係することも指摘できた。また、わが国の中・西連系系統へもこの解析を広げ、連系線電力変動比の理論値と実測値との対比も行っており、その一致を認定し、また変動負荷単位容量のブロック間での不揃いを指摘することもできた。以下、これについて報告する。

2. 単純3ブロック連系における諸量の応答解析

問題の本質を探究するために対象を単純化して、図1のような連系について考察する。

図1. 単純3ブロック連系
Fig.1. Simple 3 blocks linkage

これら3ブロックは同じ規模で、それぞれ同じ振幅の需給アンバランスが発生し、しかもその変動は相互に無相関だとする。まず左ブロックでステップ状の変動が起これるとその影響は左連系線に1次遅れ応答の形で現れ、更に右連系線へは2次遅れ応答の形で現れる。従って右ブロックは右連系線上の電力変動を、中ブロックは左右の連系線電力変動の差を、左ブロックは自ブロックで発生したステップ状変動から左連系線電力変動を差し引いた部分を自己調整している。過去の実測経験に基づく前提である。(文献(2))

需給アンバランスはステップ状というよりもランダムに発生すると考える方が实际的である。しかもシステムを線形として扱うことに特に問題はないと考えられるので、この考察には周波数応答法を用いるのが合理的である。その準備として3ブロックそれぞれで変動が発生した場合、それぞれのブロックの分担への伝達関数を表1に示す。

表1. 自己調整伝達関数
Table 1. Transfer function of self-regulations

伝達先 発生元	左	中	右
左	$3 - \frac{2}{1+TS}$	$\frac{2}{1+TS} - \frac{1}{(1+TS)^2}$	$\frac{1}{(1+TS)^2}$
中	$\frac{1}{1+TS}$	$3 - \frac{2}{1+TS}$	$\frac{1}{1+TS}$
右	$\frac{1}{(1+TS)^2}$	$\frac{2}{1+TS} - \frac{1}{(1+TS)^2}$	$3 - \frac{2}{1+TS}$

従って、発生元の原因変動分散値に対する伝達先の応動変動分散値の割合は表2のようになる。

表2. 自己調整分散値比
Table 2. Self-regulation variance ratio

伝達先 発生元	左	中	右
左	$\frac{1+9\omega^2T^2}{1+\omega^2T^2}$	$\frac{1+4\omega^2T^2}{(1+\omega^2T^2)^2}$	$\frac{1}{(1+\omega^2T^2)^2}$
中	$\frac{1}{1+\omega^2T^2}$	$\frac{1+9\omega^2T^2}{1+\omega^2T^2}$	$\frac{1}{1+\omega^2T^2}$
右	$\frac{1}{(1+\omega^2T^2)^2}$	$\frac{1+4\omega^2T^2}{(1+\omega^2T^2)^2}$	$\frac{1+9\omega^2T^2}{1+\omega^2T^2}$

3. 単純3ブロック連系における中央と両端の自己調整分比較

各発生元での外乱発生はブロック間で無相関と前提すれば、表2の値を伝達先ブロック別に合算した値が、3原因が重なった場合の各ブロックの自己調整応動分担の分散値比ということになる。その結果は次式の通りである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{左ブロック、右ブロック} \\ (3+11\omega^2T^2+9\omega^4T^4)/(1+\omega^2T^2)^2 \\ \text{中ブロック} \\ (3+18\omega^2T^2+9\omega^4T^4)/(1+\omega^2T^2)^2 \end{array} \right\} \quad [1]$$

この結果は、全く同じ規模のブロックであっても、その連系位置によって自己調整分の分担が異なり、その比率は次のようになることを示している。

$$\left(\frac{\text{中ブロックの自己調整分散値}}{\text{端ブロックの自己調整分散値}} \right) = \frac{3+18\omega^2T^2+9\omega^4T^4}{3+11\omega^2T^2+9\omega^4T^4} = \lambda \quad [2]$$

この比率は短周期変動の或帯域で相当に大きくなる。そこで、この帯域の所在について検討してみる。系統の応答時定数 T は、国内では一般に3秒程度と見られている。そこで、 T を3秒として上記の比率が大きくなる帯域を試算してみた。その結果を図2に示す。

図2. λ と変動周期 τ との関係
Fig.2. Relation between λ and τ

図2から、変動周期10~60秒の帯域で λ 値が1.15を上まわり、最高は24.8秒周期において1.33に達することがわかる。現行のTBCバイアスは各ブロックの自己調整機能つまり電力・周波数特性に基づいて設定されているが、TBCは図2の範囲より長い周期の変動を対象に実施されているので、 λ 値のことは問題無いと考えられる。しかし、自己調整機能が系統容量に比例しないという帯域の存在は、次に述べるような点で問題となる。

4. 自己調整分の系統容量比ずれが連系線電力変動に与える影響

m 単位系と n 単位系が連系しているものとする。それぞれの単位系については、次のような前提を置く。

- (1) 各単位系は系統容量が等しい。
- (2) 各単位系は定常的には、それぞれ電源と負荷が均等である。
- (3) 各単位系内で発生する需要変動の大きさは等しく、発生は相互に無相関である。標準偏差を h とする。
- (4) 各単位系の電力・周波数特性については、単位系ごとに若干の差異がある。

これらの単位系 m 個で構成されるブロックと n 個で構成されるブロックが図3のように連系しているものとして、連系線電力変動を考えてみる。

図3. 2系統連系

Fig.3. State of system linkage (2 areas)

m ブロックを構成する各単位系の平均の電力・周波数特性を p 、 n ブロックのそれを q とする。 m ブロックの特性は $m \cdot p$ 、 n ブロックのそれは $n \cdot q$ である。従って、 m ブロックで発生した需給アンバランス $\sqrt{m} \cdot h$ の中で連系線に出るのは、 $\sqrt{m} h n q / (m p + n q)$ であり、 n ブロックで発生した $\sqrt{n} \cdot h$ の中で連系線に出る変動も同様にして $\sqrt{n} h m p / (m p + n q)$ である。原因たる変動の発生が相互に無相関であるから、その結果たる連系線上の応動も直交しており、連系線電力変動の分散値 σ_u^2 は次式のようになる。

$$\sigma_u^2 = \frac{m n (n q^2 + m p^2) h^2}{(m p + n q)^2} = \frac{m n h^2 (n + m r^2)}{(m r + n)^2} \quad [3]$$

ただし、 $p/q = r$

この式の値は、 $r=1$ のときに最小値となる。ここで m と n の比を 2:1 とした場合の r と σ_u^2 の関係を図4に示す。

図4. r と σ_u^2 との関係

Fig.4. Relation between r and σ_u^2

このように、自己調整機能が系統容量比を外れると連系線電力変動が増加する。ただし、これは外乱値が系統容量

の平方根に比例すると前提した上での結論であり、後述するようにこの前提が崩れると上記の結論も違った様相を見せる。

5. 中・西連系系統における需要変動の伝達

ところで、現実の系統は連系ブロック数も多く、ブロック規模も不揃いである。そこで我が国の中・西 60Hz 連系系統について自己調整分の偏りがブロック位置と規模によってどのような様相を示すかを検討し、併せて連系線電力変動の理論値も算出して実測値との照合を試みてみた。検討対象の系統を図5に示す。

A~D: 系統容量、 X~Z: 連系線電力変動

図5. 4系統連系

Fig.5. State of 4 blocks linkage

図5の4ブロックそれぞれにおいて需要変動が発生したときの各ブロックの自己調整応動および各連系線電力変動への伝達関数を、表3に示す。ただし $L=A+B+C+D$ 、 $N=B+C+D$ と置き、各隣接ブロック応動の立ち上がり時定数を何れも3秒と前提する。なお、図1および表1で前提し、この表3でも同様の前提を適用しているが、ブロック連系で隣の隣へは変動が2次遅れで伝達されるということは、過去の実測に基づいている。(文献(2))

表3. 中・西連系における各伝達関数

Table 3. Transfer functions at C-W linkage

OUT IN	自己調整応答				連系線電力変動		
	A	B	C	D	X	Y	Z
A	$1 - \frac{N/L}{1+3S}$	$\frac{B/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{N/L}{1+3S} - \frac{(B+D)/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{D/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{N/L}{1+3S}$	$\frac{B/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{D/L}{(1+3S)^2}$
B	$\frac{A/L}{(1+3S)^2}$	$1 - \frac{(L-D)/L}{1+3S}$	$\frac{(L-B)/L}{1+3S} - \frac{(A+D)/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{D/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{A/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{(L-B)/L}{1+3S}$	$\frac{D/L}{(1+3S)^2}$
C	$\frac{A/L}{1+3S}$	$\frac{B/L}{1+3S}$	$1 - \frac{(L-C)/L}{1+3S}$	$\frac{D/L}{1+3S}$	$\frac{A/L}{1+3S}$	$\frac{B/L}{1+3S}$	$\frac{D/L}{1+3S}$
D	$\frac{A/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{B/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{(L-D)/L}{1+3S} - \frac{(A+B)/L}{(1+3S)^2}$	$1 - \frac{(L-D)/L}{1+3S}$	$\frac{A/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{B/L}{(1+3S)^2}$	$\frac{(L-D)/L}{1+3S}$

6. 中・西連系系統における需要変動伝達状況の解析

表3の S を ω の複素関数に変換して実数部と虚数部の2乗和を求めると、それはランダム入出力間のその ω 成分の分散値比となることは、よく知られている。そこで、表3の各伝達関数から発生原因変動分散値に対する伝達先の応動変動分散値の大きさの割合を ω の関数として求めた。結果を表4に示す。

ただし共通分母たる $(1+9\omega^2)^2 L^2$ の記載を省いている。

表4. 発生元～伝達先間の変動分散値比

Table 4. Variance ratio between disturbance and response

外乱 分散	自己調整分応答				連系線電力変動		
	A	B	C	D	X	Y	Z
$\alpha^2 A$	$(1+9\omega^2)^2$ $(A^2+9\omega^2 L^2)$	B^2	$(C^2+9\omega^2 L^2)$	D^2	$(1+9\omega^2)^2 \omega^2$	B^2	D^2
B	A^2	$(1+9\omega^2)^2$ $(B^2+9\omega^2 L^2)$	$C^2+9\omega^2(L-B)^2$	D^2	A^2	$(1+9\omega^2)^2$ $(L-B)^2$	D^2
$\gamma^2 C$	$(1+9\omega^2)^2 A^2$	$(1+9\omega^2)^2 B^2$	$(1+9\omega^2)^2$ $(C^2+9\omega^2 L^2)$	$(1+9\omega^2)^2 D^2$	$(1+9\omega^2)^2 A^2$	$(1+9\omega^2)^2 B^2$	$(1+9\omega^2)^2 D^2$
$\delta^2 D$	A^2	B^2	$C^2+9\omega^2(L-D)^2$ $(C^2+9\omega^2 L^2)$	$(1+9\omega^2)^2$ $(D^2+9\omega^2 L^2)$	A^2	B^2	$(1+9\omega^2)^2$ $(L-D)^2$

7. 外乱値の見直し

自己調整機能について論を進めているが、外乱たる需要変動或いはLFC調整残が系統容量の平方根に比例するという従来から一般になされている前提には疑問がある。本節ではその根拠と解釈について、実例によって検討する。

まず、疑問の生ずる根拠であるが、それは前記の中・西連系系統における連系線電力変動データに基づいている。一般に、大系統と小系統の連系の場合の連系線電力変動は小系統側の需要変動と見なしても大きな誤差はない。そのことについて実例で説明する。ここで、需要変動が系統容量の平方根比になっていると前提する。そうでないという根拠の説明にそうであるとの前提を使用することは論理が矛盾しているが、連系線上の変動が小系統側の変動にほぼ等しいことを大ざっぱに説明するためなので、敢えてこの前提を採用する。ここでA、B、C、Dを現実の系統容量を考慮して次のように置く。

$$A = 12D, \quad B = 3D, \quad C = 2D$$

従って各系の需要変動は次のようになる。

$$A \text{ 系: } \sqrt{12} \cdot \Delta D \quad B \text{ 系: } \sqrt{3} \cdot \Delta D$$

$$C \text{ 系: } \sqrt{2} \cdot \Delta D \quad D \text{ 系: } \Delta D$$

連系線電力変動は、外乱発生系とは反対側の系の自己調整応援分であるから、それぞれのケースについて次のようになる。

D系以外 対 D系の場合 (連系線 Z)

$$\text{自己調整} \quad D \text{ 系以外 } \Delta D \cdot (17/18) = 0.9444 \Delta D$$

$$\text{応援分} \quad D \text{ 系} \quad \sqrt{17} \Delta D \cdot (1/18) = 0.2291 \Delta D$$

$$\text{連系線変動} \quad \Delta Z = \sqrt{0.9444^2 + 0.2291^2} \cdot \Delta D = 0.9718 \Delta D$$

$$D \text{ 系の変動: } \Delta D$$

$$\text{誤差} \quad (1.0 - 0.97) / 1.0 = 0.03 \quad (3.0\%)$$

C系以外 対 C系の場合 (W=X+Y+Z と置く)

$$\text{自己調整} \quad C \text{ 系以外 } \sqrt{2} \Delta D \cdot (16/18) = 1.2571 \Delta D$$

$$\text{応援分} \quad C \text{ 系} \quad \sqrt{16} \Delta D \cdot (2/18) = 0.4444 \Delta D$$

$$\text{連系線変動} \quad \Delta W = \sqrt{1.2571^2 + 0.4444^2} \cdot \Delta D = 1.3333 \Delta D$$

$$C \text{ 系の変動: } \sqrt{2} \cdot \Delta D$$

$$\text{誤差} \quad (1.414 - 1.333) / 1.414 = 0.057 \quad (5.7\%)$$

B系以外 対 B系の場合 (連系線 Y)

$$\text{自己調整} \quad B \text{ 系以外 } \sqrt{3} \Delta D \cdot (15/18) = 1.4434 \Delta D$$

$$\text{応援分} \quad B \text{ 系} \quad \sqrt{15} \Delta D \cdot (3/18) = 0.6455 \Delta D$$

$$\text{連系線変動} \quad \Delta Y = \sqrt{1.4434^2 + 0.6455^2} \cdot \Delta D = 1.5812 \Delta D$$

$$B \text{ 系の変動: } \sqrt{3} \cdot \Delta D$$

$$\text{誤差} \quad (1.732 - 1.581) / 1.732 = 0.087 \quad (8.7\%)$$

つまり、B、C、D系の需要変動は、連系線電力の実測データから10%以内の誤差で推定できるということである。そこで、X、Y、Zのデータから推定したところ、D系はB系に比べて系統容量平方根比よりかなり小さく、C系はB系に比べて平方根比よりかなり大きいのである。

次に、このような需要変動の系統容量平方根比からのずれの解釈について考察する。ここで、需要変動がブロック相互間で直交していることは認められるが、その変動の最小単位は均一ではないことを指摘したい。例えばここに負荷変動が10%で容量が10kwの負荷が10組あるとしよう。その組相互間で変動が直交しておればトータルの負荷変動は $\sqrt{10}$ kwである。一方で同じく10%変動で容量100kwの負荷が1台あるとしよう。これの変動は当然に10kwである。どちらのケースも容量トータルは100kwである。しかるに負荷変動には $\sqrt{10}$ と10の違いがある。つまり、小粒の負荷ばかりで構成される系統と大粒の負荷が比較的多い系統との間では、必ずしも負荷変動は系統容量の平方根に比例しないと考えられる。

次に、需要変動の系統容量平方根比からのずれの取り扱いであるが、B系に比べてD系は小さく、C系は大きくずれているのであるから、一応B系を基準として扱うことにする。A系については上述の簡易推定法は適用できないので、AとBの間では系統容量平方根比の前提を一応の基準として適用する。なお、基準適用の意味は、最終的には連系線電力変動の理論値が実測値と合致するようにAで調整することを考えたから、平方根比はあくまで基準ということである。そこで、A、B、C、D系の外乱標準偏差値を $\alpha\sqrt{A}$ 、 $\sqrt{B}$ 、 $\gamma\sqrt{C}$ 、 $\delta\sqrt{D}$ と置いて、 γ と δ は連系線実測値による簡易推定結果で設定し、 α は連系線の理論値と実測値の合致で最終整定する。

8. 諸量算出およびそれらの系統容量、連系線電力実データとの対比

まず、各応動の分散値を計算する。すなわち、表4の各欄の式に最左列の外乱分散値を乗じ、それを縦方向に合計する。これらは各時間帯、各 ω について、それぞれのA、B、C、D、 α 、 γ 、 δ の値に依存する。各量を求めた上で、 $\sigma_A \sim \sigma_D$ については系統容量との対比を、 $\sigma_X \sim \sigma_Z$ については実測データ値との対比をチェックしてみた。その結果の一例を表5、表6に示す。

表5. 自己調整分比標準偏差値とその系統容量対比

Table 5. S.D. of self regulation value and its ratio to system capacity (S.D.: standard deviation)

項目 変動 周期	自己調整分比理論値(SD)				同左の系統容量対比			
	a	b	c	d	a/A	b/B	c/C	d/D
30 秒	6.50	1.88	3.07	0.66	0.151	0.211	0.428	0.195
60 秒	5.22	1.35	1.67	0.43	0.122	0.151	0.233	0.127
120 秒	4.20	0.98	0.96	0.35	0.098	0.110	0.134	0.103
240 秒	9.97	2.08	1.72	0.79	0.232	0.232	0.240	0.233
480 秒	14.19	2.96	2.39	1.12	0.331	0.330	0.333	0.330
960 秒	7.01	1.46	1.18	0.55	0.163	0.163	0.165	0.162

表6. 連系線電力変動比理論値および実測値との対比 (S D 値: 標準偏差値) (12 時~18 時)

Table 6. Analytical value of link power and its ratio to measured value

項目 変動 周期	理論値(SD) ₀			実測値(SD) ₁			(SD) ₀ /(SD) ₁		
	X ₀	Y ₀	Z ₀	X ₁	Y ₁	Z ₁	X ₀ /X ₁	Y ₀ /Y ₁	Z ₀ /Z ₁
30 秒	3.68	2.37	0.89	19.14	12.30	4.15	0.192	0.192	0.214
60 秒	3.59	2.61	0.70	22.48	16.37	3.58	0.160	0.160	0.196
120 秒	3.26	2.64	0.75	29.96	24.29	5.92	0.109	0.109	0.127
240 秒	5.40	3.26	1.37	31.23	19.80	7.94	0.173	0.165	0.173
480 秒	7.43	3.89	1.66	35.54	16.54	7.41	0.209	0.229	0.225
960 秒	4.81	2.92	1.47	21.00	13.30	6.41	0.229	0.219	0.229

これらはいずれもブロック間の相対比較の数値であり、連系線実測値以外は実単位を持たせていない。実単位評価については別論文として発表の予定である。なお、各時間帯、各ω帯域の外乱値調整係数の整定状況を表7に示す。

表7. 外乱値調整係数の整定結果

Table 7. Set value of adjusting coefficient of disturbance

時間帯	T 帯 sec	α	γ	δ	時間帯	T 帯 sec	α	γ	δ
0 ~ 6 時	30	1.05	1.70	0.50	12 ~ 18 時	30	1.10	1.76	0.55
	60	0.92	1.49	0.34		60	0.88	1.42	0.36
	120	0.46	1.44	0.36		120	0.65	1.18	0.40
	240	1.01	1.38	0.53		240	2.08	1.37	0.65
	480	1.26	1.10	0.41		480	3.01	1.91	0.71
6 ~ 12 時	960	0.87	1.37	0.32		960	1.27	1.82	0.78
	30	0.93	1.57	0.50	18 ~ 24 時	30	1.24	1.82	0.53
	60	0.70	1.59	0.45		60	1.12	1.46	0.39
	120	0.76	1.26	0.45		120	1.28	1.29	0.36
	240	1.41	0.99	0.63		240	1.55	1.40	0.48
	480	0.99	1.07	0.63		480	2.64	1.70	0.55
960 秒	960	3.01	1.22	0.64		960	1.00	1.09	0.47

これら表5~表7等の試算結果で注目される点を示す。

(1) 自己調整分比理論値の短周期(30秒、60秒)帯域に、BブロックとCブロックの間の逆転が見られる。(B系の方がC系よりも系統容量が大きいのに自己調整機能は逆になっている。これは、他の時間帯でも同様である。)

(2) 自己調整分比理論値の系統容量対比で見ると短周期帯域でのC系の突出が目立つ。第2位はB系である。この傾向は中周期まで見られる。480秒周期、960秒周期では4ブロックともほぼ同じ値に収斂している。中央に位置するC系の値が30秒周期で他の3ブロックのその2倍以上になっていることは、顕著な結果である。これは制御とは無関係な偏りである。

(3) 連系線電力変動は理論値も実測値も共にYとZの比が60~120秒周期で拡大する。理論値と実測値との対比は、よく揃っていると言えよう。(YとZの比はBブロックとDブロックの外乱値比にほぼ等しい。長周期帯域にはLFCの影響も出ていると考えられる。)

(4) 外乱値調整係数についてはγが最大でαは1.0の前後であり、δは最小である。これは需要変動或いは調整残の系統容量平方根比からの偏りの目やすである。

9. 中・西連系系統において連系線電力変動が受けている影響のチェック

自己調整分の系統容量比ずれが連系線電力変動に与える影響については4章で基本的な説明をしたが、これが中・西連系系統における三連系線に対してどのように現れているかをチェックしてみる。まず、表5のデータから各連系線に関する諸元を求めると表8のようになる。この表で注目されるのは、短周期変動帯域において連系線Xに関するrが1.0から相当にずれている点とそれ以外のすべてのケースにおいてrが1.0近くにあるという点である。そこで、ずれている方のケースについて、受けている影響の程度を試算してみる。

表8. 中・西連系で自己調整分比の偏りが連系線電力変動に及ぼす影響をチェックする基礎データ(12~18時)

Table 8. Base data to check effect from self-regulation ratio to link power fluctuation at C-W linkage system

項目 変動 周期	ブロック 対	連 系 線	系統容量		自己調整分比(SD)		単位当り自己調整分比		r=p/q
			m	n	mp	nq	p	q	
30SEC	A 対他	X	42.91	19.51	6.50	5.61	0.1515	0.2875	0.53
	B 対他	Y	8.95	53.47	1.88	10.23	0.2101	0.1913	1.10
	D 対他	Z	3.39	59.03	0.66	11.45	0.1947	0.1940	1.00
60SEC	A 対他	X	42.91	19.51	5.22	3.45	0.1216	0.1764	0.69
	B 対他	Y	8.95	53.47	1.35	7.32	0.1508	0.1369	1.10
	D 対他	Z	3.39	59.03	0.43	8.24	0.1268	0.1396	0.91
120SEC	A 対他	X	42.91	19.51	4.20	2.29	0.0979	0.1174	0.83
	B 対他	Y	8.95	53.47	0.98	5.51	0.1095	0.1030	1.06
	D 対他	Z	3.39	59.03	0.35	6.14	0.1032	0.1040	0.99
240SEC	A 対他	X	42.91	19.51	9.97	4.59	0.2323	0.2353	0.99
	B 対他	Y	8.95	53.47	2.08	12.48	0.2324	0.2334	1.00
	D 対他	Z	3.39	59.03	0.79	13.77	0.2330	0.2333	1.00
480SEC	A 対他	X	42.91	19.51	14.19	6.47	0.3307	0.3316	1.00
	B 対他	Y	8.95	53.47	2.96	17.70	0.3307	0.3310	1.00
	D 対他	Z	3.39	59.03	1.12	19.54	0.3304	0.3310	1.00
960SEC	A 対他	X	42.91	19.51	7.01	3.19	0.1634	0.1635	1.00
	B 対他	Y	8.95	53.47	1.46	8.74	0.1631	0.1635	1.00
	D 対他	Z	3.39	59.03	0.55	9.65	0.1622	0.1635	0.99

外乱値調整係数をそれぞれμ、νとすれば、[3]式は次のようになる。

$$\sigma_u^2 = mn h^2 (\mu^2 n + \nu^2 m r^2) / (m r + n)^2 \quad [4]$$

そこで、rが任意の値を持つときr=1.0のときとのσ_uの対比值をR_u(r)と置けば、次式が得られる。

$$R(r) = \sqrt{(\mu^2 n + \nu^2 m r^2) / (\mu^2 n + \nu^2 m)} \cdot (m + n) / (m r + n) \quad [5]$$

これに、 $m=42.91$ 、 $n=19.51$ および各値を代入して計算すると、 $R_u(r)$ は表 9. のように求まる。

表 9. $R(r)$ の計算結果
Table 9. Calculated results of $R(r)$

周期	r	μ	ν	ν_B	ν_C	ν_D	$R(r)$
30sec	0.53	1.10	1.28	1.00	1.76	0.55	1.004
60sec	0.69	0.88	1.11	1.00	1.42	0.36	0.9782
120sec	0.83	0.65	1.00	1.00	1.18	0.40	0.9734

これは図 4 の結果と異なっているが、外乱値調整係数を考慮すると r が 1.0 から離れても連系線電力変動にあまり響かず、かえってその変動を小さくする場合もありうることを示している。なお ν の計算は次式で行った。

$$\nu = \sqrt{(1.0^2 B + \nu_C^2 C + \nu_D^2 D) / (B + C + D)} \quad [6]$$

10. まとめ

以上の研究成果をまとめると次のようになる。

(1) 自己調整分の系統容量比の連系位置による偏りは単純 3 ブロック連系の場合には、特に数十秒周期帯域で中央ブロックの端部ブロックに対する倍率が最高で 1.33 倍まで増えることが判った。この傾向は現実の中・西連系統ではさらに顕著であり、30 秒周期における C のこの値の倍率は A に対して 2.83 倍、D に対して 2.19 倍である。第 2 位は B 系であるが、これは連系位置の他に外乱値の偏りや系統容量も関係しているからである。とにかく、端部に対して中央の値が大きいことは単純モデルの場合以上である。

(2) 連系線電力変動の ω 特性は、実測値については表 6 の結果が意味を持っている。しかし理論値については一見、480 秒に山があるように見えるが、これは外乱値調整係数の影響が現れているだけである。この研究では、ブロック間の相対比較（横並び）を念頭に置いており、 ω 特性（縦並び）は、原因である需要変動のスペクトルが不明な段階では無意味である。ここで考えたいのは外乱（需要変動等）がすべてに対する原因だということであり、LFC の制御効果（外乱抑制）が連系線電力変動にとって重要であることは論を持たない。

(3) 三連系線電力変動の中で、短周期での X は自己調整分比の相当大きい偏りの影響を受けるが、変動幅は増加しないことが理論的に示された。

(4) 今回の解析では需要変動或いは調整残の直交を前提しているが、変動単位の容量が不揃いであると前提した。それは連系線電力変動に各 ω 帯域ごとの実測値があるので、理論値がなるべくそれに近づくように、B ブロックを 1.0 として A、C、D ブロックの外乱値調整係数を取り入れたことである。すなわち、D ブロックは系統容量平方根比の割には外乱値が小さいこと、C ブロックはその反対で外乱値の割合が大きいことを、連系線電力変動実測値から推定して調整係数に反映させた。C ブロックの γ が、A の α や B の 1.0 に比べて大きいことは意外であったが、この結論は実測値に基づいているので、確実だと考える。

本研究に当たって貴重な実測データの提供を頂いた中国電力株式会社系統運用部の各位に対し深甚の謝意を表する。
(平成 7 年 2 月 24 日受付, 同 7 年 7 月 12 日再受付)

文 献

- (1) 関根 泰次：電力系統工学（電気書院）P.36, P.51
- (2) 電気学会給電専門委員会：電気学会技術報告(II 部) 第 40 号, 電力系統の負荷・周波数制御 P.33, P.55, P.73
- (3) 本田 公韶・ほか：「系統連系位置と自己調整分の偏り及びその連系線電力変動への影響」, 電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集(平成 6 年 10 月)P.321,
- (4) 本田 公韶・ほか：「系統規模の異なる 4 ブロック連系における自己調整分の偏り」, 電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集(平成 6 年 10 月)P.323,

本田 公韶（正員）1925 年 7 月 7 日生。1948 年 3 月名古屋大学卒業。同年 4 月中国電力欄入社。最終は技術研究所次長。1980 年 8 月同社退職。同年 9 月広島工業大学教授、現在に至る。電力系統制御の研究等に從事。工学博士。

佐々木 博司（正員）1941 年 3 月 10 日生。1968 年 3 月早稲田大学大学院博士課程（電気工学専攻）修了。同年 4 月広島大学工学部講師。1980 年 10 月第二類（電気系）助教授。1989 年 11 月同教授（電力工学教育科目担当）、現在に至る。工学博士。主に、電力系統の過渡安定度、状態推定、最適潮流計算法、エキスパートシステムやニューラルネットワークなど人工知能応用に関する研究に従事。IEEE, CIGRE、日本太陽エネルギー学会、情報処理学会、エネルギー・資源学会会員。

長田 稔（非会員）1969 年 5 月 10 日生。1995 年 3 月広島工業大学大学院工学研究科修士課程修了。現在、日本下水道事業団在職。

真恵原 悟（非会員）1971 年 7 月 26 日生。1994 年 3 月広島工業大学卒業。現在、同学大学院工学研究科修士課程（2 年）在学中。

横瀬 宏（正員）1934 年 10 月 1 日生。1964 年 3 月東京電機大学大学院修士課程修了。同年 4 月広島工業大学工学部講師。1969 年 10 月助教授。1985 年 4 月教授、現在に至る。電気機器制御、自然エネルギー利用の研究等に從事。工学博士。