連系系統における零潮流現象の解析

正 員 宮 澤 正 樹 (東北学院大)

正 員 久保木 實 (東北学院大)

An Analysis of a Zero-Power Flow Phenomenon
in an Interconnecting Power System

Masaki Miyazawa, Member, Minoru Kuboki, Member (Tohoku Gakuin University)

Today's power systems are characterized in that more power demand is concentrated in urban areas, increasingly centralized power facilities are getting larger in size and located in remoter places, and power condensers tend to be upgraded in order to improve power factor. These movements each reduce the stability power limit, permitting the effect of a power failure to spread much further.

In such an interconnecting power system, when power is transmitted from a power source (a small system) in a remote place to a big city (a large system) with great power demand, a zero-power flow phenomenon, where power transmission is impossible when power flow in the interconnecting power system is zero, is expected to occur, depending on a combination of the size of branch load and its power factor. In future power systems that will extend further, have a larger capacity, and be more capacitive, such a phenomenon would be more liable to take place. In this thesis, a new formula to analyze a zero-power flow phenomenon is derived, and using the formula, areas in which a zero-power flow phenomenon takes place are also discussed. With an experimental system simulating a practical 500 kV power system, the occurrence of a zero-power flow phenomenon could be verified.

キーワード：連系系統，分岐負荷，進み負荷力率，零潮流，発生領域，発電機脱調

1. ま え が き

近年の電力系統の特徴は、需要の都市集中化、電源の大規模集中化・遠隔化および力率改善（電圧降下および損失の軽減）を図るため、電力用コンデンサの増強などの傾向がますます強くなっている。これらはいずれも安定送電限界を低減させ、事故波及効果を助長していくものである。

このような連系系統において、遠隔地の電源（小系統）から需要の集中する大都市（大系統）へ電力を送電する場合に、分岐負荷の大きさとその力率の組合せによっては、連系線の潮流が零の状態では送電不能となる零潮流現象の発生が予見される。今後、ますます長距離大容量化されつつある電力系統において、この現

象の発生する可能性があるものと考えられる。

零潮流現象とは、小系統から大系統へ送電する場合に、発電機の定格容量、線路こう長、分岐負荷の位置およびその負荷条件の組合せによっては、連系系統の安定限界相差角が発電機の相差角と等しくなり、連系線の有効電力が零の状態では発電機が余力を残したまま不安定となり、送電不能となる現象をいう。これまでに、この現象の解析はあまりなされていないようである⁽¹⁾。

本論文では、零潮流現象を解析するための新しい算定式を誘導し、この算定式から、零潮流現象が発生する系統条件と分岐負荷の負荷条件との関係を明らかにしている。また、この算定式を基にして、発電機の定格容量、線路こう長、分岐負荷の負荷容量とその負荷力

率が変化するとき、および高压系統から低压系統に至るまでの電圧クラスの変化に伴う零潮流現象の発生領域について明らかにした。そして、今後、ますます長距離大容量化されつつある 500 kV の電力系統を想定して、この実系統を模擬した実験系統により零潮流現象の発生を検証することができたので^{(2)~(5)}、以下に述べるものである。

2. 零潮流現象の発生理論

〈2・1〉 安定限界相差角の算定式 図 1 に零潮流現象の解析系統図を示す。同図に示すように、小系統と大系統の連系系統において、ここでは、小系統側の送電端に分岐負荷がある場合を考える。いま、小系統側および大系統側の発電機定格容量、線路こう長、分岐負荷容量およびその負荷力率が変化したときの安定送電限界について考えてみる。

なお、図 1 で各記号は次のとおりである。

- W_G : 小系統発電機 G_1 の定格容量
- $\dot{V}_G$: W_G の内部誘起電圧
- $\dot{V}_S, \dot{V}_R$: 送電端および受電端電圧
- $\dot{V}_m$: 電氣的センタの電圧
- $\dot{I}_G, \dot{I}_L, \dot{I}_S$: G_1 の電流, 負荷電流および連系線電流
- P_G, Q_G : G_1 の有効および無効電力
- P_L, Q_L : 負荷の有効および無効電力
- P_S, Q_S : 送電端の有効および無効電力
- P_R, Q_R : 大系統に流れる有効および無効電力
- X_G : G_1 のリアクタンス
- X_{ts} : 変圧器のリアクタンス ($X_1 = X_G + X_{ts}$)
- X_2 : 連系線のリアクタンス
- X_{m1} : 送電端から電氣的センタまでのリアクタンス
- X_{m2} : 電氣的センタから大系統発電機 G_2 までのリアクタンス ($X_2 = X_{m1} + X_{m2}$)
- l : 線路こう長
- R_L, X_L : 負荷の抵抗, リアクタンス
- $\dot{Y}_L$: 負荷の合成アドミタンス
- $\cos \phi_L$: 負荷力率
- M_1, M_2 : G_1, G_2 の慣性定数
- δ_{12} : $\dot{V}_G$ と $\dot{V}_R$ の相差角 (δ_{12m} : 安定限界相差角)
- δ_g : $\dot{V}_G$ と $\dot{V}_S$ の相差角
- δ_l : 連系線側 ($\dot{V}_S$ と $\dot{V}_R$) の相差角 ($\delta_{12} = \delta_g + \delta_l$)

図 1 の連系系統の安定送電限界相差角 δ_{12m} は、 ρ 法から (1) 式で求められる。

図 1 解析系統図

Fig. 1. Power system for analysis.

$$\tan \delta_{12m} = \frac{M_1 + M_2}{M_1 - M_2} \tan \beta \quad (1)$$

(1) 式で、 β は送電系統全体の合成四端子定数 $\dot{B}$ の位相角である。

(1) 式から、安定限界条件は、発電機の慣性定数により次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (1) \quad M_1 < M_2 \text{ の場合には,} \\ \tan \delta_{12m} = -\tan \beta = \tan(180^\circ - \beta) \\ \therefore \delta_{12m} = 180^\circ - \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} (2) \quad M_1 > M_2 \text{ の場合には,} \\ \tan \delta_{12m} = \tan \beta \\ \therefore \delta_{12m} = \beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} (3) \quad M_1 = M_2 \text{ の場合には,} \\ \therefore \delta_{12m} = 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また、 β の誘導については、図 1 で連系系統全体の合成四端子定数 $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$ から、

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}_L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jX_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & jX_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{Y}_L = 1/R_L + j/X_L$$

従って、

$$\begin{aligned} \therefore \dot{B} &= B \angle \beta = \dot{A}_1 \dot{B}_2 + \dot{B}_1 \dot{B}_2 \dot{Y}_L + \dot{B}_1 \dot{D}_2 \\ &= jX_2 + jX_1 jX_2 (1/R_L + 1/jX_L) + jX_1 \\ &= jX_1 jX_2 (1/R_L + 1/jX_L + 1/jX_1 + 1/jX_2) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\therefore \tan \beta = -R_L (1/X_L + 1/X_1 + 1/X_2) \quad (7)$$

ここで、 $m = X_2/X_1$ 、負荷率 $n_p = P_L/W_G$ と定義すれ

ば、(7)式は、

$$\begin{aligned}\therefore \beta &= 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{1+m}{m} \frac{R_L}{X_1} + \tan \phi_L \right) \\ &= 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{1+m}{m} \frac{1}{n_p X_1 (\text{pu})} \right. \\ &\quad \left. + \tan \phi_L \right) \dots \dots \dots (8)\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}X_1 (\text{pu}) &= \frac{X_1 W_G}{V_s^2}, \quad P_L = V_s^2 / R_L \\ \tan \phi_L &= R_L / X_L\end{aligned}$$

従って、(1)、(8)式から、小系統側および大系統側の発電機定格容量、線路こう長、分岐負荷容量およびその負荷力率が変化したときの連系系統の安定送電限界について容易に解析することができる。

〈2・2〉 零潮流安定限界条件の算定式 零潮流現象は小系統から大系統へ送電する場合に発生する。そこで、図1の解析系統図において、大系統に流れる有効電力が零となる零潮流安定限界条件について解析した。

大系統に流れる有効電力が零となる零潮流時は、

$$P_R \doteq P_S = 0 \dots \dots \dots (9)$$

このとき連系線に流れる無効電力 Q_s は、連系線側の相差角 $\delta_L = 0$ において解くと、

$$Q_s = \frac{1}{X_2} V_s (V_s - V_R) \dots \dots \dots (10)$$

また、この零潮流時における小系統側発電機 G_1 の内部誘起電圧 V_G の相差角 δ_θ は V_s を基準にして解くと、

$$V_G = V_G \angle \delta_\theta = V_s + j\sqrt{3} X_1 \dot{I}_G \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 $\dot{I}_G$ は G_1 から流れる電流である。 $\dot{I}_G$ は、

$$\begin{aligned}P_L + j(Q_s + Q_L) &= \sqrt{3} V_s \bar{\dot{I}}_G \\ \therefore \dot{I}_G &= \frac{P_L - j(Q_s + Q_L)}{\sqrt{3} V_s} \dots \dots \dots (12)\end{aligned}$$

従って、(11)式は(12)、(10)式から

$$\begin{aligned}\dot{V}_G &= V_s + j\sqrt{3} X_1 \dot{I}_G \\ &= V_s + j\sqrt{3} X_1 \frac{P_L - j(Q_s + Q_L)}{\sqrt{3} V_s} \\ &= V_s \left(1 + \frac{X_1}{X_2} \frac{V_s - V_R}{V_s} + \frac{X_1 Q_L}{V_s^2} + j \frac{X_1 P_L}{V_s^2} \right) \\ &= V_s \left(\frac{\varepsilon + m}{m} + \frac{X_1}{R_L} \tan \phi_L + j \frac{X_1}{R_L} \right) \\ &= n_p X_1 (\text{pu}) V_s \left(\frac{\varepsilon + m}{m} \frac{1}{n_p X_1 (\text{pu})} \right. \\ &\quad \left. + \tan \phi_L + j \right) \dots \dots \dots (13)\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{V_s - V_R}{V_s}, \quad Q_L = V_s^2 / X_L \\ \therefore \delta_\theta &= \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon + m}{m} \frac{1}{n_p X_1 (\text{pu})} + \tan \phi_L \right)^{-1} \\ &\dots \dots \dots (14)\end{aligned}$$

従って、連系系統における零潮流安定限界の条件は

$$\delta_{12m} = \delta_\theta \dots \dots \dots (15)$$

(15)式は、(2)、(8)、(14)式から、

$$\begin{aligned}\therefore \frac{1+m}{m} \frac{1}{n_p X_1 (\text{pu})} + \tan \phi_L \\ = \left(\frac{\varepsilon + m}{m} \frac{1}{n_p X_1 (\text{pu})} + \tan \phi_L \right)^{-1} \dots \dots \dots (16)\end{aligned}$$

(16)式を満足する連系系統では零潮流現象が発生する。また、(16)式からわかるように、小系統側の発電機定格容量 (X_1)、線路こう長 (X_2)、分岐負荷容量 (n_p) およびその負荷力率 ($\tan \phi_L$) がそれぞれ変化したときの零潮流現象の発生条件を容易に求めることができる。

3. 零潮流現象の解析結果および考察

零潮流現象は小系統から大系統へ送電する場合に発生する。そこで、第2章で述べた零潮流現象の発生理論の(16)式を用いて、小系統側の発電機定格容量、線路こう長、分岐負荷容量およびその負荷力率が変化したときの零潮流現象の発生条件および発生領域について解析した。解析にあたっては、今後、ますます長距離大容量化されつつある 500 kV の系統を選び解析した。表1に解析系統の諸定数を示す。ただし、表1で、発電機リアクタンス ($X_g = 119\%$)、変圧器リアクタンス ($X_{ts} = 15\%$) の値は発電機の定格容量に無関係に一定とするものとする。

〈3・1〉 零潮流安定限界相差角 図2は、負荷力率 $\cos \phi_L$ が -0.9 (進み) および 1.0 のときの m (線路こう長 l) と安定限界相差角 δ_{12m} の関係グラフ

表1 解析系統の諸定数
Table 1. power system constants for analysis.

発電機定格容量	$W_G = 2,800, 5,600, 8,400 \text{ MVA}$
〃 リアクタンス	$X_g = 119\%$
変圧器 〃	$X_{ts} = 15\%$
送電端電圧	$V_s = 525 \text{ kV}$
受電端電圧	$V_R = 500 \text{ kV}$
負荷容量 (n_p : 負荷率)	$p_L (\text{MW}) (n_p = p_L / W_G)$
負荷力率	$\cos \phi_L$
送電線 (1 回線)	ACSR 810 mm ² × 4
線路定数	$z = 0.0089 + j0.274 \Omega/\text{km}$
	$y = j4.06 (\mu\text{s}/\text{km})$
線路こう長	$l (\text{km}) (m = X_2 / X_1)$

図2 m (こう長 l) と安定限界相差角 δ_{12m} の関係
Fig. 2. Relation between m (transmission distance l) and stability power angle limit δ_{12m} .

表2 零潮流現象の発生系統例
Table 2. Power system example of zero-power flow phenomenon region.

$\cos \phi_L$		-0.9 (進み)			1.0	
n_p		0.6	0.85	0.9	0.85	0.9
m		2.41	0.51	0.43	3.57	2.35
$\delta_{12m} = \delta_g (^\circ)$		52	65	66	48	50
l (km) 1回線	$W_c = 2,800 \text{ MVA}$	—	250	208	—	—
	$= 5,600 \text{ MVA}$	624	124	103	—	606
	$= 8,400 \text{ MVA}$	398	83	69	615	388

ただし、—は、1,000 km 以上

である。同図から、 δ_{12m} は $n_p=0$ で 90° であり、 n_p が大きいほど、負荷力率が進むほど小さくなるのがわかる。図中の一点鎖線は零潮流安定限界となる点を結んだ零潮流安定限界曲線である。表2に、図1から求めた零潮流安定限界となる系統の一例を示した。例えば、 $\cos \phi_L = -0.9$ のとき、 $n_p = 0.6$ では (この場合、発電機のほうは40%ほど余力があることになる)、 $m = 2.41$ で零潮流安定限界となる (図2の●印)。このとき $\delta_{12m} = \delta_g = 52^\circ$ である。この m をこう長 l (1回線) で表せば、発電機定格容量が $W_c = 5,600 \text{ MVA}$ では 624 km 、 $8,400 \text{ MVA}$ では 398 km となる。また、 $n_p = 0.9$ では (この場合、発電機のほうは10%ほど余力があることになる)、 $m = 0.43$ で零潮流安定限界となる (図2の●印)。このとき $\delta_{12m} = \delta_g = 66^\circ$ である。この m をこう長 l (1回線) で表せば、 $W_c =$

図3 負荷力率 $\cos \phi_L$ と安定限界相差角 δ_{12m} の関係
Fig. 3. Relation between load power factor $\cos \phi_L$ and stability power angle limit δ_{12m} .

$2,800 \text{ MVA}$ では 208 km 、 $5,600 \text{ MVA}$ では 103 km 、 $8,400 \text{ MVA}$ では 69 km となる。同様に、 $\cos \phi_L = 1.0$ のとき、 $n_p = 0.9$ では、 $m = 2.35$ で零潮流安定限界となり、 $\delta_{12m} = \delta_g = 50^\circ$ である。この m をこう長 l (1回線) で表せば、 $W_c = 5,600 \text{ MVA}$ では 606 km 、 $8,400 \text{ MVA}$ では 388 km となる。このように、零潮流現象は発電機定格容量が大きいほど、長距離ほど、負荷容量が大きいほど、負荷力率が進みの低力率ほど発生する可能性があることがわかる。これは(7)式からもわかるように、発電機定格容量が大きいほど、長距離ほど、負荷容量が大きいほどおよび負荷力率が遅れから進みになるほど、系統全体の合成四端子定数 B の位相角 β が大きくなるので安定限界相差角が小さくなるからである。また、発電機定格容量の大きさによつては、 $X_2 = mX_1$ より連系線の組合せで比較的短い距離でも発生する可能性がある。

図3に、負荷力率 $\cos \phi_L$ と安定限界相差角 δ_{12m} の関係を図4に、負荷容量 n_p と δ_{12m} の関係グラフを示す。図3および図4から、負荷力率が進みの低力率ほど、負荷容量が大きいほど δ_{12m} は小さくなり、零潮流現象の発生領域が拡大していくことがわかる。図5は発電機定格容量 W_c が $5,600 \text{ MVA}$ および $8,400 \text{ MVA}$ のときの負荷力率 $\cos \phi_L$ と零潮流安定限界こう長 l の関係グラフである。同図より、発電機の定格容量が大きいほど、負荷容量が大きいほど、負荷力率が進みの低力率ほど零潮流安定限界こう長 l は短くなることがわかる。

図6は発電機定格容量 W_c が $5,600 \text{ MVA}$ で負荷力

図4 負荷容量 n_p と安定限界相角 δ_{12m} の関係

Fig. 4. Relation between load capacity n_p and stability power angle limit δ_{12m} .

図5 負荷力率 $\cos \phi_L$ と零潮流安定限界こう長 l の関係

Fig. 5. Relation between load power factor $\cos \phi_L$ and zero-power flow transmission distance limit l .

率 $\cos \phi_L$ が -0.9 のときの、線路こう長 l と安定限界送電容量 P_R および安定限界発電容量 P_G との関係グラフである。同図より、 $n_p = 0.6$ のとき $l = 624$ km で $P_R = 0$ となり、そのときの P_G は W_G の60%の出力で不安定となっていることがわかる (図10参照)。

〈3・2〉 零潮流現象の発生領域 零潮流現象の発生領域については、今後ますます長距離大容量化の傾

図6 線路こう長 l と安定限界送電容量 P_R 、安定限界発電容量 P_G との関係

Fig. 6. Relation between transmission distance l and stability power limit P_R, P_G .

図7 零潮流安定限界こう長 l と発電機定格容量 W_G の関係 (系統電圧クラス別)

Fig. 7. Relation between zero-power flow transmission distance limit l and generator's rated capacity W_G (system voltage level).

向にある電力系統のみならず現在の電力系統も含めて、発電機定格容量、線路こう長、分岐負荷容量およびその負荷力率が変化したときの発生領域について解析した。図7および図8に零潮流現象の発生領域を示す。両図からわかるように、零潮流現象は高压系統のみならず低压系統でも発生し、発電機定格容量が大きいほど、長距離ほど、負荷容量が大きいほど、負荷の力率が進みほど発生する可能性がある。また、低压系

図 8 負荷力率 $\cos \phi_L$ と零潮流安定限界こう長 l の関係 (系統電圧クラス別)

Fig. 8. Relation between load power factor $\cos \phi_L$ and zero-power flow transmission distance limit l (system voltage level).

表 3 系統電圧クラス別の零潮流現象発生系統例

Table 3. Power system example of zero-power flow phenomenon region in system voltage level.

$\cos \phi_L$		-0.9(進み)	
n_p		0.6	0.9
V_R (kV)	W_G (MVA)	零潮流安定限界こう長 l (km) (1 回線)	
500	5,600	624	103
275	1,700	544	91
154	560	403	69
66	100	435	75

統では、 $X_2 = mX_1$ より発電機定格容量が小さくて、進み力率ほど系統全体の合成四端子定数 B の位相角 β が大きくなるので、比較的短い距離でも発生する可能性がある。表 3 に、図 8 から求めた系統電圧クラス別の零潮流現象発生系統の一例を示した。例えば、表 3 から、 $V_R = 275$ kV、 $W_G = 1,700$ MVA で $\cos \phi_L = -0.9$ のとき $n_p = 0.6$ では零潮流安定限界こう長 l (1 回線) は 544 km となり、 $n_p = 0.9$ では 91 km となる。なお、表 3 の W_G の値は、表 5 の 500 kV の基準容量 1,120 MVA を基にして計算した。

〈3・3〉 零潮流現象の実験検証例 零潮流現象を実験で検証するために、模擬送電線の設計理論⁽⁴⁾により実系統を模擬した模擬系統で行った。表 4 に、零潮流現象が発生する 500 kV の実系統の系統諸定数と、これを 200 V で模擬した模擬系統との関係を示

表 4 実系統と模擬系統との関係

Table 4. Relationship between existing transmission line and artificial transmission line.

	実系統	模擬系統
発電機定格容量 W_G	5,600 MVA	2 kVA
// リアクタンス X_G	119%	119%
変圧器 //	X_{ts} 15%	15%
送電端電圧 V_s	525 kV	200 V
受電端電圧 V_R	500 kV	190.5 V
送電端負荷容量 p_L	3,360 MW	1.2 kW
// 負荷率 n_p	0.6 (0.9)	0.6 (0.9)
負荷力率 $\cos \phi_L$	-0.9 (進み)	-0.9 (進み)
送電線 1 回線 (ACSR 810 mm ² × 4)		
線路定数 z	$0.0089 + j0.274 \Omega/\text{km}$	$0.00362 + j0.111 \Omega/\text{km}$
y	$j4.06 \mu\text{s}/\text{km}$	$j10.0 \mu\text{s}/\text{km}$
線路こう長 l $n_p = 0.6$	624 km	624 km
$= 0.9$	($X_2 = 159 \Omega$) 103 km ($X_2 = 28.2 \Omega$)	($X_2 = 64.6 \Omega$) 103 km ($X_2 = 11.5 \Omega$)

表 5 基準値

Table 5. Reference values.

	実系統電圧 (kV)				模擬系統 電圧 (V)
	500	275	154	66	200
基準容量 (MVA)	1,120	339	106	20	400 (VA)
基準電圧 (kV)	525	290	160	70	200 (V)
基準電流 (A)	1,232	675	383	163	1.15 (A)
基準インピーダンス X (Ω)	246	246	246	246	100 (Ω)
基準アドミタンス Y_C (ms)	4	4	4	4	10 (ms)

注) 275 kV、154 kV、66 kV の基準容量は 500 kV の基準容量 ($W_G = 1,120$ MVA) をベースとして電圧の 2 乗比で計算した。

例えば、275 kV の基準容量は $(275/500)^2 \cdot 1,120 = 339$ MVA

す。表 5 に実系統と模擬系統における基準値を示す。

また、図 9 に $n_p = 0.6$ のときの実験回路図を示す。

模擬発電機の定格は、定格容量 2 kVA、定格電圧 200 V、定格電流 5.8 A、定格力率 1.0、定格回転数 1,500 rpm、励磁電圧 100 V、励磁電流 1.3 A、発電機リアクタンス 14.08 Ω 、単位慣性定数 M_{01} が約 1 秒の三相同期発電機である。なお、発電機リアクタンスの模擬は $X_G = 119\%$ になるように不足分 9.72 Ω のリアクタンスを発電機の端子に外付けした。

発電機の出力調整は、発電機に直結されている直流電動機の界磁を手動で調整して行った。また送電端電圧の調整は、発電機の界磁を手動で一定値 (200 V) に調整して行った。

実験方法は、初めに無限大母線 (配電系統) と 2 kVA の同期発電機を連系し、その後、送電端に負荷を接続する。次に発電機の出力を徐々に上げていく

図 9 実験回路

Fig. 9. Experimental circuit.

図 10 零潮流現象の波形

Fig. 10. Waveform of zero-power flow phenomenon.

と、連系線の有効電力(P_R)は次第に零に近づき、零で安定限界相差角が発電機の相差角と等しくなり($n_p=0.6$ では $\delta_{12m}=\delta_g=52^\circ$, $n_p=0.9$ では 66° となる)発電機は不安定に陥り動揺して脱調する。その様子を $n_p=0.6$ の場合を図10に、 $n_p=0.9$ の場合を図11に示した。図10から、連系線の有効電力が零($P_R=0$)となる脱調開始点から電氣的センタの電圧が零($V_m=0$)となる脱調点に至るまでの時間は0.46秒である。また、動揺周期は0.76秒であった。これを単位慣性定数8秒の実系統値に換算するとそれぞれ $\sqrt{8}$ 倍して1.3秒、2.15秒となる。同様に、図11から、

np=0.9, cos φL=-0.9, l=103 km

図 11 零潮流現象の波形

Fig. 11. Waveform of zero-power flow phenomenon.

図 12 連系線遮断と再投入時($l=624$ km)の波形
Fig. 12. Breaking and reclosing waveform of interconnection line ($l=624$ km).

脱調過程に要した時間は0.9秒、動揺周期は0.27秒である。これを実系統値に換算するとそれぞれ2.55秒、0.76秒となる。更に、この脱調した状態で連系線を遮断し、発電機を単独運転すると発電機は安定し、この連系線を再投入すると脱調する。その様子を

図12 ($n_p = 0.6$ の場合)に示した。連系線を遮断すると安定するのは、 $m=0$ となって安定化の方向へ移行するからである。

4. ま と め

以上本論文では、連系系統における零潮流現象を解析するための新しい算定式を誘導し、実験によりこの理論を検証することができた。そして、この算定式を基にして、零潮流現象の発生条件および発生領域を明確にすることができた。以下、解析結果を要約すると次のようになる。

(1) 零潮流現象は、小系統から大系統へ送電するときに発生し、発電機定格容量、線路こう長、小系統側の分岐負荷容量およびその負荷力率によって変化する。特に、発電機定格容量が大きいほど、長距離ほど、分岐負荷容量が大きいほどおよびその負荷力率が進みの低力率ほど零潮流現象の発生領域が拡大することがわかった。

(2) 零潮流現象は、高圧系統のみならず低圧系統でも、負荷の力率が進みほど比較的短い距離でも発生する可能性がある。

(3) 実系統を模擬した実験系統から、零潮流現象が発生すると、小系統側の発電機は動揺して不安定となり、脱調する様相を明らかにすることができ、本解析理論を実証することができた。

以上の解析結果からわかるように、本理論により零潮流現象の発生条件および発生領域を明らかにすることができたので、今後は分岐負荷の位置による零潮流現象の解析および特異性を明らかにし、更にこの現象の発生に伴う不安定現象の防止対策および有効な系統の安定化制御について検討していきたい。

(平成4年1月21日受付)

文 献

- (1) 斉藤・新田目、他：「長距離送電系統における定態安定度特性の解析」, 電学論 B, 98, 633 (昭53-7)
- (2) 宮澤・久保木：「簡易計算法による定態安定度および零潮流現象の解析」, 電気学会電力技術研資, PE-87-74 (昭62)
- (3) 宮澤・久保木：「長距離送電線路における零潮流現象の解析」, 昭62電気関係学会東北支部連大, 1E2
- (4) 宮澤・久保木：「連系系統における零潮流現象の解析」, 電気学会電力技術研資, PE-88-160 (昭63)
- (5) 宮澤・久保木：「模擬送電線路による零潮流現象の実験的検証」, 昭63電気学会全大, No. 938

宮澤 正 樹 (正員)

昭和45年3月山形大学工学部電気工学科卒業。同年4月富士電機製造(株)入社。54年4月東北学院大学工学部電気工学科助手, 59年同講師, 平成元年同助教授, 現在に至る。主として, 電力工学を担当。

久保木 實 (正員)

大正13年2月11日生。昭和20年9月浜松工業専門学校電気工学科卒業。東京大学工学部電気工学科高電圧研究室を経て, 23年2月日本放送電(株)入社。26年5月東北電力(株)引継, 38年8月同社給電部系統技術課長, 46年3月同社技術部調査役。その間, 系統技術開発, 総合自動化計画, 系統連系計画などに従事。38年9月~42年3月東北大学工学部非常勤講師。54年4月東北学院大学工学部教授, 電力工学担当, 現在に至る。工学博士。31年, 43年オーム技術賞, 40年電気学会進歩賞受賞。