UDC 621.315.051.024: 621.3.025
621.314.58

論 文

49-B 23

交直連系系統における交流電圧安定度 解析手法の開発

電力中央研究所

吉 田 幸 雄

1. ま え が き

将来、直流送電の発展とともに、長距離大容量送電、離島への送電、負荷過密地域への送電に直流送電を適用することが考えられ、この場合には従来の直流送電系統にくらべ直流系容量が増大し交流系統容量と直流系容量の比が小となる傾向が考えられる。このように、交流系の短絡容量 W_s と直流系容量 P_{dN} の比 W_s/P_{dN} が小さくなると、順変換器は主として交直連系電圧の高調波波形ひずみによる高調波不安定振動、逆変換器は主として

(i) 交直連系点の基本波交流電圧変動特性と順・逆変換器の制御系に関連する不安定振動

(ii) 交流系統のリアクタンスと変換器用フィルタのコンデンサとが高調波共振回路を形成する場合の高調波振動を発生する。

上記(i)の基本波交流電圧変動による不安定現象は交流電圧安定度と呼ばれている。⁽¹⁾

順変換器の高調波不安定現象の解明には種々の研究がなされており、安定運転限界や高調波安定度を向上する位相制御方式が明らかとされている。⁽³⁾⁽⁴⁾ また、逆変換器の交流電圧安定度については変換器制御系の時定数、利得を無視した場合に交流ならびに直流系の系統条件や変換器の制御条件が電圧安定度に与える影響を定性的に検討した研究や、安定運転限界を実験的に求めた定量的な研究がなされている。⁽¹⁾⁽²⁾ しかし、逆変換器の交流電圧安定度は変換器制御系の時定数、利得に大きく影響され、さらに交流ならびに直流系の系統条件によっても左右されるので、これを一般的に

解析する必要がある。

筆者は、このたび変換器制御系を一次遅れ系で近似し、交直連系系統の定常時の平衡点における微小変動分に対してフルビッツの安定判別条件を適用した交流電圧安定度解析プログラムを開発した。本論文は開発した解析手法について述べるとともに、解析結果と模擬装置による実験結果を比較し本解析手法の妥当性を明らかにした。また、本解析手法を用いて交流系ならびに直流系の系統条件と変換器の制御条件が交流電圧安定度に及ぼす影響を明らかにし、モデル系統を想定して安定運転限界を解析したものである。なお負荷急変、系統条件急変、潮流反転などの大きな外乱に対する電圧安定度については、本論文では解析しておらずこの点については今後検討を進めていく予定である。

2. 交直連系々統の関係式

対象とする交直連系々統を第1図に順ならびに逆変換器側交流系統のベクトル図を第2図に示す。また、本論文で使用した主なる記号を第1表に示す。第1図で順・逆変換器側交流系統は無限大母線+直列リアクトル、直流回路は直流リアクトル+線路抵抗、変換器の制御系は一次遅れ系で近似した。

〈2・1〉 交流系統の関係式 第1図より順変換器側交流系統に対しては次の関係式が成立する。

$$\dot{V}_{100} = \dot{V}_{1ac} + (r_{s1} + jx_{s1}) \dot{I}_{1ac} \dots\dots\dots (1)$$

第1図 対象としたモデル系統

Fig. 1. AC-DC power transmission system studied.

Development of a Calculated Method of AC Voltage Stability in HVDC Transmission System. By Y. YOSHIDA, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)
吉田幸雄：正員，電力中央研究所技術第一研究所電力第2部

第2図 交直連系システムのベクトル図

Fig. 2. Vector diagram of AC-DC power transmission system.

第1表 使用した主なる記号

Table 1. Main symbols used.

要素	記号*
交流系統の短絡容量	W_{s1}, W_{s2}
“ のリアクタンス	x_{s1}, x_{s2}
“ 交線路抵抗	r_{s1}, r_{s2}
交直連系点の負荷	$P_{L1}, P_{L2} (r_{L2}, r_{L2})$
“ のコンデンサ容量	$Q_{c1}, Q_{c2} (1/Y_{c1}, 1/Y_{c2})$
交流系統の有効・無効電力、電流	$P_{1ac}, Q_{1ac}, I_{1ac}, P_{2ac}, Q_{2ac}, I_{2ac}$
直流変換器出口の有効・無効電力、電流	$P_1, Q_1, I_1, P_2, Q_2, I_2$
交直連系点の線間交流電圧	V_{1ac}, V_{2ac}
無限大母線の “	$V_{1\infty}, V_{2\infty}$
母線電圧と交直連系点電圧の相差角	θ_1, θ_2
変換器の力率角	φ_1, φ_2
定格直流電力	P_{dN}
直流電圧・電流	E_{d1}, E_{d2}, I_d
変換器用変圧器のインピーダンス	x_{t1}, x_{t2}
変換器用変圧器の変圧比（一次電圧/一次電圧）	n
直流リアクトル、直流線路抵抗、直流回路の時定数	L_d, R_d, T_d
順変換器定電流制御系の利得、時定数	k_1, T_1
定余裕角制御系の利得、時定数	k_2, T_2
定電圧制御系の利得、時定数	k_3, T_3
定電力制御系の利得、時定数	k_5, T_5
変換器直列数	m
変換器の制御角、余裕角	α, β, δ

* : 1: 順変換器側, 2: 逆変換器側。

$$\dot{I}_{c1} = jY_{c1}\dot{V}_{1ac} \quad (2)$$

$$\dot{I}_{r1} = \dot{V}_{1ac}/r_{L1} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{1ac} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{r1} \quad (4)$$

$$P_1 = V_{1ac}I_1 \cos \varphi_1 \quad (5)$$

$$Q_1 = V_{1ac}I_1 \sin \varphi_1 \quad (6)$$

ここで、 I_1 は変圧器直流巻線に流れる線電流 I_{t1} の $\sqrt{3}$ 倍であり、 $I_1 = \sqrt{3}I_{t1}$ で表わされる。

第2図のベクトル図と(5)、(6)式より(7)式が成立つ。

$$\tan \theta_1 = \frac{x_{s1}(P_1 + P_{L1}) - r_{s1}(Q_1 + Q_{c1})}{r_{s1}(P_1 + P_{L1}) + x_{s1}(Q_1 + Q_{c1}) + V_{1ac}^2} \quad (7)$$

同様に逆変換器側交流系に対しても、次の関係式が成立する。

$$\dot{V}_{2ac} = \dot{V}_{2\infty} + (r_{s2} + jx_{s2})\dot{I}_{2ac} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{c2} = jY_{c2}\dot{V}_{2ac} \quad (9)$$

$$\dot{I}_{r2} = \dot{V}_{2ac}/r_{L2} \quad (10)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{r2} + \dot{I}_{2ac} \quad (11)$$

$$P_2 = V_{2ac}I_2 \cos \varphi_2 \quad (12)$$

$$Q_2 = V_{2ac}I_2 \sin \varphi_2 \quad (13)$$

ここで、 I_2 は線電流 I_{t2} の $\sqrt{3}$ 倍であり、 $I_2 = \sqrt{3}I_{t2}$ で表わされる。

$$\tan \theta_2 = \frac{x_{s2}(P_2 - P_{L2}) - r_{s2}(Q_2 - Q_{c2})}{V_{2ac}^2 - x_{s2}(Q_2 - Q_{c2}) - r_{s2}(P_2 - P_{L2})} \quad (14)$$

また、交直連系点の電流関係式は次のようになる。

$$I_1 \doteq \sqrt{3} \left(\frac{m}{n} \right) \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) I_d \quad (15)$$

$$I_2 \doteq \sqrt{3} \left(\frac{m}{n} \right) \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) I_d \quad (16)$$

上記の関係式(1)～(4)と(8)～(11)式を d - q 軸成分に分解し、(15)、(16)式を用いると次式を得る。

$$i_{d1}^2 + i_{q1}^2 = \left(\frac{m}{n} \right)^2 \frac{18}{\pi^2} I_d^2 \quad (17)$$

$$i_{q1} \cos \theta_1 + i_{d1} \sin \theta_1 = \left(\frac{m}{n} \right) \frac{\sqrt{18}}{\pi} I_d \cos \varphi_1 \quad (18)$$

$$i_{d2}^2 + i_{q2}^2 = \left(\frac{m}{n} \right)^2 \frac{18}{\pi^2} I_d^2 \quad (19)$$

$$i_{q2} \cos \theta_2 - i_{d2} \sin \theta_2 = \left(\frac{m}{n} \right) \frac{\sqrt{18}}{\pi} I_d \cos \varphi_2 \quad (20)$$

〈2・2〉 直流系の関係式 周知のように直流系では次の関係式が成り立つ。

$$E_{d1} = \left\{ 1.35 \frac{V_{1ac}}{n} \cos \alpha - \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_1 \right) I_d \right\} \times m \quad (21)$$

$$E_{d2} = \left\{ 1.35 \frac{V_{2ac}}{n} \cos \beta + \left(\frac{3X_2}{\pi} + r_2 \right) I_d \right\} \times m$$

$$\dots\dots\dots (22)$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha - \frac{X_1 I_d}{\sqrt{2} V_{1ac}/n} \dots\dots\dots (23)$$

$$\cos \varphi_2 = \cos \beta + \frac{X_2 I_d}{\sqrt{2} V_{2ac}/n} \dots\dots\dots (24)$$

$$\cos \delta - \cos \beta = \frac{\sqrt{2} X_2}{V_{2ac}/n} I_d \dots\dots\dots (25)$$

$$L_d \frac{dI_d}{dt} + R_d I_d = E_{d1} - E_{d2} \dots\dots\dots (26)$$

ただし, X_1, X_2 : 変換器の転流リアクタンス,
 r_1, r_2 : 変換器の内部抵抗

また, (23), (18) 式及び交流系の電圧関係式より順変換器側と逆変換器側についておの次の式が成り立つ。

$$v_{d11} i_{d1} + v_{q11} i_{q1} = \left(\frac{m}{n}\right) \frac{\sqrt{18}}{\pi} V_{1ac} I_d \cos \alpha \\ - \frac{3m}{\pi} X_1 I_d^2 \dots\dots\dots (27)$$

$$v_{d12} i_{d2} + v_{q12} i_{q2} = \left(\frac{m}{n}\right) \frac{\sqrt{18}}{\pi} V_{2ac} I_d \cos \beta \\ + \frac{3m}{\pi} X_2 I_d^2 \dots\dots\dots (28)$$

順・逆変換器の制御系の関係式は制御方式の種類により次のようになる。ただし, 開ループ余裕角制御系以外の制御系は一次遅れ系で近似し, 開ループ余裕角制御系の時定数は無視した。

(1) 順変換器 定電流制御 (ACR), 逆変換器: 定余裕角制御 (A δ R) の場合

ACR 系

$$T_1 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = -k_1 (I_{ds} I_d) \dots\dots\dots (29)$$

A δ R 系

$$T_2 \frac{d\beta}{dt} + \beta = k_2 (\delta_s - \delta) \text{ (開ループ)} \dots\dots (30)$$

$$\cos \beta = \cos \delta_s - \frac{\sqrt{2} X_2}{V_{2ac}/n} I_d \text{ (開ループ)} \\ \dots\dots\dots (31)$$

(2) 逆変換器 定電圧制御 (AVR) の場合

AVR 系

$$T_3 \frac{d\beta}{dt} + \beta = -k_3 (E_{d2s} - E_{d2}) \dots\dots\dots (32)$$

(3) 逆変換器 定電流制御 (ACR) の場合

ACR 系

$$T_4 \frac{d\beta}{dt} + \beta = k_4 (I_{ds} - I_d) \dots\dots\dots (33)$$

(4) 順変換器 定電力制御 (APR) の場合

APR 系

$$T_5 \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = -k_5 (P_{ds} - P_d) \dots\dots\dots (34)$$

ただし, $I_{ds}, \delta_s, E_{d2s}, P_{ds}$: おの直流電流設定値, 余裕角設定値, 直流電圧設定値, 電力設定値

〈2・3〉 微小変動分に対する関係式

(1) 交流系の関係式 上記の交流系の関係式を初期値 (平衡点) の近傍の微小変動分について変分し, $\Delta V_{1ac}, \Delta I_d, \Delta \alpha$ と $\Delta V_{2ac}, \Delta I_d, \Delta \beta$ に注目して整理すれば次の関係式が成立する。

順変換器側交流系統に対して

$$f_1 \Delta V_{1ac} + f_2 \Delta I_d + f_3 \Delta \alpha = 0 \dots\dots\dots (35)$$

逆変換器側交流系統に対して

$$g_1 \Delta V_{2ac} + g_2 \Delta I_d + g_3 \Delta \beta = 0 \dots\dots\dots (36)$$

ただし, $f_1 \sim f_3, g_1 \sim g_3$: 系統条件と初期条件より定まる定数

が成り立つ。

(2) 直流系の関係式 直流系の微小変動分については, 次の関係式が成り立つ。

$$\Delta E_{d1} = 1.35 \frac{m}{n} \cos \alpha_0 \Delta V_{1ac} \\ - 1.35 \frac{m}{n} V_{1ac0} \sin \alpha_0 \Delta \alpha \\ - m \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_1 \right) \Delta I_d \dots\dots\dots (37)$$

$$\Delta E_{d2} = 1.35 \frac{m}{n} \cos \beta_0 \Delta V_{2ac} \\ - 1.35 \frac{m}{n} V_{2ac0} \sin \beta_0 \Delta \beta \\ + m \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_2 \right) \Delta I_d \dots\dots\dots (38)$$

$$L_d \frac{d\Delta I_d}{dt} + R_d \Delta I_d = \Delta E_{d1} - \Delta E_{d2} \dots (39)$$

$$T_1 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + \Delta \alpha = k_1 \Delta I_d \dots\dots\dots (40)$$

$$T_2 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = -k_2 \Delta \delta \dots\dots\dots (41)$$

$$\Delta \beta = \frac{\sqrt{2} X_2 n}{V_{2ac0} \sin \beta_0} \left(\Delta I_d - \frac{I_{d0}}{V_{2ac0}} \Delta V_{2ac} \right) \\ \dots\dots\dots (42)$$

$$T_3 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = k_3 \Delta E_{d2} \dots\dots\dots (43)$$

$$T_4 \frac{d\Delta \beta}{dt} + \Delta \beta = -k_4 \Delta I_d \dots\dots\dots (44)$$

$$T_5 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + \Delta \alpha = k_5 \Delta P_d$$

$$=k_5(E_{d10}\Delta I_d + I_{d0}\Delta E_{d1}) \dots\dots\dots (45)$$

$$\Delta\delta = -c_1\Delta I_d + c_2\Delta\beta \dots\dots\dots (46)$$

ただし,

$$c_1 = \frac{\sqrt{2}X_2n}{V_{2ac0}\sin\delta_0} \left(1 + \frac{q_2I_{d0}}{g_1V_{2ac0}}\right)$$

$$c_2 = \frac{1}{\sin\delta_0} \left(\sin\beta_0 - \frac{\sqrt{2}g_3X_2I_{d0}}{g_1V_{2ac0}^2/n}\right)$$

(3) 交直連系々統の状態方程式 (35), (36)式を(37)~(39)式に代入して ΔI_d , $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の関係式にまとめると次式を得る。

$$\frac{d\Delta I_d}{dt} = \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} \Delta I_d - \frac{B_3}{T_d R_d} \Delta\alpha + \frac{B_4}{T_d R_d} \Delta\beta \dots\dots (47)$$

ただし,

$$B_1 = 1.35 \frac{m}{n} \frac{q_2}{g_1} \cos\beta_0 - m \left(\frac{3X_2}{\pi} + r_2 \right)$$

$$B_2 = 1.35 \frac{m}{n} \frac{f_2}{f_1} \cos\alpha_0 + m \left(\frac{3X_1}{\pi} + r_1 \right)$$

$$B_3 = 1.35 \frac{m}{n} \left(\frac{f_3}{f_1} \cos\alpha_0 + V_{1ac0} \sin\alpha_0 \right)$$

$$B_4 = 1.35 \frac{m}{n} \left(\frac{q_3}{g_1} \cos\beta_0 + V_{2ac0} \sin\beta_0 \right)$$

$$T_d = L_d/R_d$$

(1) 順変換器 定電流制御, 逆変換器: 定余裕角制御の場合

(a) 閉ループ余裕角制御(46)式を(41)式に代入すると余裕角制御系の関係式は次のようになる。

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = \frac{k_2 c_1}{T_2} \Delta I_d - \frac{1+k_2 c_2}{T_2} \Delta\beta \dots\dots\dots (48)$$

したがって, (40), (47), (48)式をまとめると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} & \frac{B_4}{T_d R_d} \\ \frac{k_1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{k_2 c_2}{T_2} & 0 & -\frac{1+k_2 c_1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (49)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (50)$$

ただし, $\cdot = d/dt$

(b) 開ループ余裕角制御の場合 (36), (42), (47)式より次の関係式を得る。

$$\frac{d\Delta I_d}{dt} = \frac{1}{T_d R_d} \left(B_1 - B_2 - R_d + \frac{B_4 c_1}{c_2} \right) \Delta I_d - \frac{B_3}{T_d R_d} \Delta\alpha \dots\dots\dots (51)$$

したがって, この場合の状態方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_d R_d} \left(B_1 - B_2 - R_d + \frac{B_4 c_1}{c_2} \right) * \\ \frac{k_1}{T_1} \\ * \\ -\frac{B_3}{T_d R_d} \\ -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots (52)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots (53)$$

(2) 順変換器: 定電流制御, 逆変換器: 定電圧制御の場合 (36), (38), (43)式より次の式を得る。

$$\frac{d\Delta\beta}{dt} = -\frac{k_3 B_1}{T_3} \Delta I_d - \frac{1+k_3 B_4}{T_3} \Delta\beta \dots\dots (54)$$

したがって, この場合の状態方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} & \frac{B_4}{T_d R_d} \\ \frac{k_1}{T_1} & -\frac{1}{T_1} & 0 \\ -\frac{k_3 B_1}{T_3} & 0 & -\frac{1+k_3 B_4}{T_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (55)$$

(3) 順変換器: 定電力制御, 逆変換器: 定余裕角制御の場合 順変換器が定電力制御の場合は(35), (37), (45)式より次式が成り立つ。

$$\frac{d\Delta\alpha}{dt} = \frac{k_5(E_{d10} - I_{d0}B_2)}{T_5} \Delta I_d - \frac{1+k_5 I_{d0}B_3}{T_5} \Delta\alpha \dots\dots\dots (56)$$

したがって, 状態方程式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_1 - B_2 - R_d}{T_d R_d} & -\frac{B_3}{T_d R_d} \\ \frac{k_4(E_{d10} - I_{d0} B_2)}{T_4} & -\frac{1 + k_4 I_{d0} B_3}{T_4} * \\ \frac{k_2 c_1}{T_2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{pmatrix} \quad (57)$$

$$* = \begin{pmatrix} \frac{B_4}{T_d R_d} & 0 \\ 0 & -\frac{1 + k_2 c_2}{T_2} \end{pmatrix}$$

なお、順変換器は無制御逆変換器が定電流制御、あるいは順変換器が定電流制御逆変換器が無制御の場合の状態方程式は、おのおの $\Delta \alpha = 0, \Delta \beta = 0$ とおくことにより求めることができる。

3. 交流電圧安定度の判別条件と解析プログラム

〈3・1〉 交流電圧安定度の判別条件 (50) 式の特性根を入とすれば特性方程式は次のようになる。

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (58)$$

すなわち、

$$\lambda^3 - (a_{11} + a_{22} + a_{33})\lambda^2 + (a_{11}a_{22} + a_{22}a_{33} + a_{33}a_{11} - a_{12}a_{21} - a_{13}a_{31})\lambda + a_{12}a_{21}a_{33} + a_{13}a_{31}a_{22} - a_{11}a_{22}a_{33} = 0 \quad (59)$$

$$\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0 \quad (60)$$

したがって、(49), (55), (57) 式の系が安定となるためには、特性根 λ の実数部がすべて負となればよい。したがって、フルビッツの安定判別条件により次の各式がすべて成立しなければならない。

$$A = -(a_{11} + a_{22} + a_{33}) > 0 \quad (61)$$

$$B = a_{11}a_{22} + a_{22}a_{33} + a_{33}a_{11} - a_{12}a_{21} - a_{13}a_{31} > 0 \quad (62)$$

$$C = a_{12}a_{21}a_{33} + a_{13}a_{31}a_{22} - a_{11}a_{22}a_{33} > 0 \quad (63)$$

$$AB - C > 0 \quad (64)$$

しかし、(61), (63), (64) 式が成り立てば (62) 式も成り立つので、結局、安定であるためには、(61), (63), (64) 式が成立すればよい。同様に (53) 式が安定であるためには次の関係式が成り立つ必要がある。

$$\left. \begin{aligned} A &= -(a_{11} + a_{22}) > 0 \\ B &= (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) > 0 \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

(a) プログラム

第 3 図 交流電圧安定度解析のフロー図概要

Fig. 3. Flow-diagram of AC voltage stability calculation.

〈3・2〉 交流電圧安定度解析プログラム 解析プログラムは次の二通りを作成した。

(a) 直流電力を $P_d = 0$ から微小分 ΔP_d ステップで増加し、安定判別を行なうプログラム

(b) 定格直流電力 P_{dN} を与えた場合に安定限界における変換器制御系の利得と時定数の関係を求めるプログラム

第 3 図は上記プログラムの概略のフロー図を示したものであり、本プログラムの初期値の与え方は次のとおりである。

(1) 交流系の初期値 (i) 系統のベース容量 = W_B (MVA), ベース電圧 = E_B (kV), (ii) 順・逆変換器側交流系の短絡容量 = W_{s1}, W_{s2} (MVA), (iii) 交流線路抵抗 = r_{s1}, r_{s2} (Ω), (iv) フィルタ+スタコン容量 = Q_{c1}, Q_{c2} (MVar), (v) 連系点負荷 = P_{L1}, P_{L2} (MW) (vi) 逆変換器側交流電圧 = V_{2ac0} (kV)

(2) 直流系の初期値 (1 変換器ユニットあたり)

(i) 直流系容量 = P_{dN} (MW) (逆変換器における), (ii) 制御角度 α, β (度), (iii) 変換器用変圧器のインピーダンス = X_{t1}, X_{t2} (%) (変圧器容量ベース), (iv) 直流リアクトル = L_d (H), (v) 直流線路抵抗 = R_d (Ω), (vi) 変換器用変圧器の変圧比 (一次電圧/二次電圧) = n_1, n_2 , (vii) 直流系の直列変換器数 = m , (viii) 変換器制御系の利得と時定数 = k_i, T_i

4. 解析結果と考察

〈4・1〉 解析結果と模擬装置による実験結果の比較

開発した解析手法の妥当性を確かめため、解析結果と模擬装置で実施した実験結果の比較を行なった。第 4

第4図 解析結果と実験結果との比較

Fig. 4. Comparison between analytic results and experimental results.

図は連系点負荷を変えた場合の両者で求めた安定運転限界の比較を示している。ただし、この場合の系統条件は次のとおりである。

短絡容量: $W_{s1}=\infty$, $W_{s2}=22\text{ kVA}$, 直流系の定格容量: $P_{dN}=22\text{ kW}$, 変圧器インピーダンス: $x_t=20\%$, 制御角 $\alpha=15$ 度, 余裕角 $\delta=18$ 度, 定電流制御系の利得と時定数: $k_1=2,000$ 度/ I_{dN} (A), $T_1=0.09$ 秒, 定余裕角制御系の利得と時定数: $k_2=40$ 度/度, $T_2=0.2$ 秒, 直流リアクタンス: $L_d=0.48$ H, 直流線路抵抗: $R_d=6.4\Omega$

第4図より明らかなように実験で求めた安定運転限界は $P_{L2}/W_{s2}=0$ のとき $W_{s2}/P_{dN}=2.75$, $P_{L2}/W_{s2}=0.1$ のとき $W_{s2}/P_{dN}=1.98$ であり, 解析ではおのおの2.5と2.06である。誤差を生じた主たる原因としては、(i)線形化による誤差, (ii)変換器の内部抵抗や変圧器の損失による誤差, (iii)制御系の利得と、時定数の模擬定数による誤差が考えられる。しかしながら、解析により安定運転限界をモデル実験より容易かつ短時間に求められるので、本解析の有利性が明らかとなった。

〈4.2〉 系統条件, 制御条件が交流電圧安定度に及ぼす影響 交直連系系統を想定し, 本解析法を用いて解析した結果を以下に示す。ただし, 変換器の制御系は順変換器が定電力制御, 逆変換器が定余裕角制御が一般に使用されているが, 電圧安定度の基本的性質をはあくするために最も基本的な順変換器の定電流制御と逆変換器の定余裕角制御について検討した。また, 余裕角制御系は閉ループ方式とした。

(1) 想定したモデル系統 想定した系統の定数は次のとおりである。

$P_{dN}=300\text{ MW}$ ($\pm 125\text{ kV}$, $1,200\text{ A}$), $\alpha_0=15$ 度, $\delta_0=20$ 度, $x_{t1}=x_{t2}=20\%$, $n=2.5$ ($275\text{ kV}/110\text{ kV}$), $Q_{c1}=Q_{c2}=90\text{ MVar}$, $L_d=1\text{ H}$, $R_d=0, 10, 20\Omega$, $W_{s1}=\infty, 1,500, 3,000, 4,500, 6,000\text{ MVA}$, $W_{s2}=300, 600, 750, 900, 1,050, 1,200, 1,500\text{ MVA}$, $T_1=$

(a) $W_{s2}=750\text{ MW}$ の場合 (b) $W_{s1}=300\text{ MW}$ の場合第5図 制御系のパラメータに対する安定運転領域 ($x_{t1}=0$, $T_2=0.1$ 秒, $P_{dN}=300\text{ MW}$)

Fig. 5. Stability region due to control parameters.

0.01~1 秒, $k_2=0\sim10,000$ (度/ I_{dN}), $T_2=0.01\sim1$ 秒, $k_2=0\sim100$ (度/度)

なお, 計算は逆変換器側の交直連系点電圧の初期値を 275 kV に指定した平衡状態について行なった。

(2) 定電流制御系の利得と時定数が電圧安定度に及ぼす影響 安定運転限界における ACR 系の k_1 , T_1 , $A\delta R$ 系の k_2 , T_2 の関係例を第5図に示す。ただし, (a)は $W_{s2}=750\text{ MVA}$ で $W_{s2}/P_{dN}=2.5$ 倍, (b)は $W_{s2}=300\text{ MVA}$ で $W_{s2}/P_{dN}=1.0$ 倍のときである。ここで, 安定であるためには, 直線①の上側 (安定条件の式 $A>0$ に相当), ②の右側 ($C>0$ に相当), ③の右側 ($AB-C>0$ に相当) をすべて満足しなければならない。(a)図の $W_{s2}/P_{dN}=2.5$ のとき, $T_1<0.1$ 秒では安定, $T_1>0.2$ 秒では不安定となり, また, (b)図の $W_{s2}/P_{dN}=1$ では安定点は得られず, 常に不安定であることがわかる。通常, k_1, k_2 は定常偏差ならびに過渡時のオーバershootを抑制する必要から $500\leq k_1\leq 5,000$, $20\leq k_2\leq 80$ であり, 使用した模擬装置では $1,500\leq k_1\leq 4,000$, $40\leq k_2\leq 80$ である。⁽⁵⁾

第6図は定電流制御系の利得と時定数が安定限界に及ぼす影響を示している。これより k_1 が大きいほど, また, T_1 が小さいほど安定運転限界は向上し, 電圧

図 6 定電流制御の時定数、利得が安定運転限界に及ぼす影響 ($T_2=0.1$ s, $k_2=40$ 度/度)

Fig. 6. Effect of time constant of ACR to AC voltage stability.

安定度に対して順変換器の定電流制御系の制御性能が大きく影響することがわかる。すなわち、 $T_1=0.01$ 秒とすれば $k_1=100$ でも $W_{s2}/P_{dN}=2$ まで安定に運転できるのに対し、 $T_1=0.3$ 秒とすれば $k_1=10,000$ としても安定運転限界は $W_{s2}/P_{dN}=3.3$ である。また同図 A の曲線より $0.03 < T_1 < 0.5$ 秒の範囲では利得 k_1 をいかなる値に選んでも、安定限界は $W_{s2}/P_{dN}=2.0$ 以下にならないことを示している。通常は $T_1=0.05 \sim 0.2$ 秒程度であるので、 $k_1=2,000$ とすれば、 $W_{s2}/P_{dN}=2.5 \sim 4.3$ となる。

(3) 順変換器側交流系インピーダンスが電圧安定度を与える影響 第 7 図は順変換器側交流系のインピーダンス (x_{s1}) が安定運転限界に与える影響を示している。ここで、 $T_1=0.1$, $T_2=0.1$, $k_2=40$ とし、 x_{s1} は 1,000 MVA, 275 kV ベースとした。すなわち、1,500 MVA は 0.666, 3,000 MVA は 0.333, 6,000

第 7 図 順変換器側インピーダンスが電圧安定度を与える影響

Fig. 7. Effect of AC system impedance of rectifier to AC voltage stability.

第 8 図 直流線路が電圧安定度に及ぼす影響 ($T_1=0.1$, $T_2=0.1$, $k_2=40$ 度/度)

Fig. 8. Effect of DC line resistance to AC voltage stability.

MVA は 0.166 に相当する。

このグラフから明らかなように、 x_{s1} が大きいほど安定運転限界は向上する。これは直流電流 I_d が増加しようとするれば、 x_{s1} により順変換器側の交直連系点電圧が降下し、 x_{s1} は I_d の増加を抑えるように動作するからである。

(4) 直流線路が電圧安定度に及ぼす影響 第 8 図は直流線路 (R_d) が大きいほど電圧安定度が向上することを示している。これは R_d が大きいと逆変器側交直連系点電圧 V_{i2} の変動に対する直流電流の変化が小さく、また直流回路の時定数が小さくなるため、等価的に定電流制御系の利得を大きくし、時定数を小さくするためである。したがって、周波数変換所のように直流線路がない場合には電圧安定度は厳しくなる。

(5) 余裕角制御系の時定数と利得が電圧安定度に及ぼす影響 第 9 図は閉ループ余裕角制御系の時定

第 9 図 定余裕角制御系 (閉ループ) 時定数利得が電圧安定度に及ぼす影響

Fig. 9. Effect of time constant of $A\delta R$ to AC voltage stability.

第 2 表 系統条件, 制御条件が交流電圧安定度に与える影響

Table 2. Effect of AC-DC system conditions and control parameters to AC voltage stability.

条 件	交 流 電 圧 安 定 度 に 及 ぼ す 影 響		モデル系統における解析例*		
			パラメータの値	安定運転限界 (W_{s2}/P_{dN})	安定度向上率 (%)
制 御 条 件	順変換器	定電流制御系の時定数 (T_1) を小とすると安定度向上	$T_1=0.05$	2.56	(+)21.2
		定電流制御系の利得 (k_1) を大とすると安定度低下	$k_1=5,000$	2.80	(+)13.8
	逆変換器	定余裕角制御系の時定数 (T_2) を小とすると安定度低下	$T_2=0.05$	5.0	(-)53.8
		定余裕角制御系の利得 (k_2) を大とすると安定度低下	$k_2=60$	4.1	(-)26.2
系 統 条 件	交流系統	順変換器側交流系のインピーダンス (x_{s1}) を大とすると安定度向上	$W_{s1}/P_{dN}=20$	2.38	(+)26.7
		逆変換器負側交流直連系点負荷 (PL_2) を大とすると安定度向上	$PL_2/P_{dN}=0.5$	2.86	(+)12.0
	直流系統	直流線路抵抗 (R_d) を小とすると安定度低下	$R_d=0$	3.8	(-)16.9

*: $x_{s1}=0$, $T_1=0.1$ 秒, $k_1=2,000$ (度/IdN), $T_2=0.1$ 秒, $k_2=40$ (度/度), $R_d=10 \Omega$, $x_{t1}=x_{t2}=20\%$ とした場合の安定運転限界 $W_{s2}/P_{dN}=3.25$ を基準とし, 各パラメータを変更した場合の安定限界と向上(低下)率を示す。(+)は向上, (-)は低下を示す。

数 T_2 を横軸に利得をパラメータとして安定運転限界示したものである。これより明かなように T_2 が小さいほど, k_2 が大きいほど電圧安定度が低下する。これは余裕角制御系の応答特性が速いほど逆変換器側交流電圧変動に対して β 角を大きく制御し, その結果直流電圧が変動して連系点電圧変動を助長するためである。したがって逆変換器側交流系統が小さい場合には定余裕角制御系の時定数ならびに利得をあまり上げることができない。

また, 開ループ余裕角制御の場合は第 9 図において時定数 T_2 が小さく, 利得 k_2 も小さいところに相当するが, 詳しくは今後検討する予定である。

以上の系統条件ならびに制御条件が電圧安定度に与える影響をまとめると第 2 表のようになる。

5. む す び

交流直連系統の定常状態における微小変動分に対して, フルビッツの安定判別条件を適用した交流電圧安定度解析手法を開発した。モデル系統について解析した結果, 電圧安定度を向上させる主なる要素は

- (1) 定電流制御の時定数を小さくし, 利得を大き

くすること

- (2) 直流線路抵抗を大きくすること

(3) 順変換器側交流系統のインピーダンスを大きくすること

- (4) 逆変換器側交流直連系点の負荷を大きくすること

である。また, 電圧安定度を低下させる主なる要素は定余裕角制御系の時定数を小さくし, 利得を大きくすることである。

終わりに, 本研究の実施にあたり種々のご指導と有益なご議論をいただいた, 電力中央研究所, 技術第一研究所電力第 2 部当任 尾出和也博士, 直流系統研究室長 町田武彦博士に深く感謝の意を表します。

(昭和 48 年 4 月 25 日受付, 同 48 年 9 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 堀米・沢田: 電気試験所彙報 29, 4, 277 (昭 39-3)
- (2) 吉田・町田: 電中研技一研報告 No. 70020 (昭 44-7)
- (3) J.D. Ainsworth: Proc. Inst. Elect. Engrs 114, 1949 (1967-7)
- (4) J. Käuferle, R. May & Y. Rogowsky: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-89, 1610 (1970-9)
- (5) 石川・町田・藤井: 電中研技一研報告 70026 (昭 44)