過渡에너지法에 의한 電力系統의 過渡安定度 解析에 관한 硏究

論 文
32~2~4

Transient Stability Analysis of Power System by Transient Energy Method

金 俊 鉉*·傑 龍 泰**
(June-Hyun Kim·Yong-Tae Sul)

Abstract

This paper deals with the transient energy method of transient stability analysis of multi-machine power system by improving the transfer conductance, the kinetic energy and the critical transient energy.

The transfer conductance is considered more correctly, the generators of system are seperated to two states (critical and the rest state) and the correction term of critical transient energy (to reference point) is added.

This analysis is performed by digital computer simulation and the application of this method to two model systems has shown its superiority to other available methods.

1. 序 論

最近 電力系統이 大型化되고 複雜해짐에 따라 系統의 正確한 解析技法이 요구되고 있으며, 특히 系統의 過渡安定度를 에너지函數에 의한 直接法으로 解析하는 것은 系統의 計劃과 運用에 매우 중요한 부분이다.

이 技法은, 系統의 狀態変化를 에너지의 개념을 도입하여 解析한 것으로서, Mangnusson과 Aylett 등에 의해 처음 제시된 후 Lyapunov 函數를 이용한 方法등이 硏究되고 있으나, 函數의 保存的特性으로 보다 正確한 技法이 요구되어 왔다.[1],[3],[10]

이러한 에너지函數法에서 가장 문제가 되는 것은, 外乱에 따른 系統의 安定·不安定을 결정하는 不安定平衡点과 伝達콘덕턴스의 正確한 算定이다.[11],[12] 不安定平衡点의 결정은 El-Abiad, Athay 등에 의해 硏究되어 왔고,[5],[6] 특히 伝達콘덕턴스項은 積分의 어려움 때문에 생략되거나 近似化하여 고려하는데,[2],[4] Uemura는 이 項을 BY-PASS 積分하여 近似化하였으나 正確性이 결여되었고,[7] Pai가 제안한 에너지函数는 이 項을 적절히 고려하였으나, 2機系統에만 적용이 可能했다.[8],[9]

따라서 本 論文에서는 過渡에너지法에서 문제가 되는 不安定平衡点과 伝達콘덕턴스項을 개선하여 고려함으로써, 보다 正確한 過渡에너지函數를 결정하는데 重点을 두었다.

먼저 伝達콘덕턴스項을 β係数로서 近似化하고, 外乱에 따른 系統內 発電機의 狀態를 곧바로 脫調할 우려가 있는 臨界発電機群과 그외의 残餘発電機群의 두 부분으로 나누어 運動에너지를 보다 正確히 算定하였다.

또한 故障除去点에서의 過渡에너지와 故障後 平衡点에 대한 에너지函数와의 基準点의 차이를 교정항을 추가하여 過渡에너지를 補定하였다.

이러한 技法을 4機 10母線과 9機 27母線의 모델系統에 適用하여 그 効用性을 評価하였다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 敎授
** 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 1982年 12月 7日

2. 過渡에너지函數

過渡에너지는 故障除去後 系統에 殘存하는 過剩에너지로서 일반적으로 同期発電機를 加速시키는 運動에너지와 過剩에너지를 흡수할 수 있는 位置에너지로 표시된다.

에너지函數를 誘導하기 위해, n개의 発電機들로 구성된 電力系統에서 外乱에 따른 i 번째 発電機의 動搖方程式을 구하면, 식 (1)과 같이 된다.[13]

$$M_i\dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} \qquad (1)$$
$$(i = 1, 2 \cdots\cdots n)$$

여기서,

M_i : i 번째 発電機의 慣性모멘트
ω_i : 〃 〃 角速度
P_{mi} : 〃 〃 機械的入力
P_{ei} : 〃 〃 電気的出力

식 (1)을 i와 j 번째 発電機의 回転子角差 ($\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$)와 故障後 安定平衡角差 ($\delta^{ss}_{ij}$)의 개념을 도입하여 다시 쓰면, 식 (2)와 같이 된다.

$$M_i\dot{\omega}_i = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{n} (C_{ij}X_{ij} + D_{ij}Y_{ij}) \qquad (2)$$

여기서,

$C_{ij} = E_iE_jB_{ij}$
$D_{ij} = E_iE_jG_{ij}$
$X_{ij} = \sin\delta^{ss}_{ij} - \sin\delta_{ij}$
$Y_{ij} = \cos\delta^{ss}_{ij} - \cos\delta_{ij}$

마찬가지로 k 번째 発電機의 動搖方程式은 식 (3)과 같이 된다.

$$M_k\dot{\omega}_k = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{n} (C_{kj}X_{kj} + D_{kj}Y_{kj}) \qquad (3)$$

i와 k번째 発電機사이의 相対加速方程式을 誘導하기 위해, 식 (2)에서 ik 項을 분리하여 양변에 M_k를 곱하고, 식 (3)의 양변에 M_i를 곱하면 각각 식 (4),(5)와 같이 된다.

$$M_kM_i\dot{\omega}_i = M_k[(-C_{ki}X_{ki} + D_{ki}Y_{ki}) + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} (C_{kj}X_{kj} + D_{kj}Y_{kj})] \qquad (4)$$

$$M_kM_i\dot{\omega}_k = M_i\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k}}^{n} (C_{kj}X_{kj} + D_{kj}Y_{kj}) \qquad (5)$$

식 (5)와 (4)의 差를 구하면

$$M_kM_i\dot{\omega}_{ki} = (M_k + M_i)C_{ki}X_{ki} + M_i\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} C_{kj}X_{kj} - M_k\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} D_{ij}X_{ij} + (M_i - M_k)D_{ki}Y_{ki} + M_i\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} D_{kj}Y_{kj} - M_k\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} D_{ij}Y_{kj} \qquad (6)$$

식 (6)의 양변에 ω_{ki}를 곱하고, $\frac{n(n-1)}{2}$相対加速方程式을 추가하여, 全 系統의 動搖狀態의 合을 구하면, 식 (7)과 같이 된다.

$$\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n} M_kM_i\dot{\omega}_{ki}\omega_{ki} = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}[(M_k + M_i)C_{ki}X_{ki} + (M_i - M_k)D_{ki}Y_{ki}]\omega_{ki} + \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq k,i}}^{n} M_j[C_{ki}X_{ki}(\omega_{kj} - \omega_{ij}) + D_{ki}Y_{ki}(\omega_{kj} + \omega_{ij})] \qquad (7)$$

식 (7)에서 右辺의 제2項과 4項은 伝達콘덕턴스 D_{ki}를 포함하고 있다. 이 項은 積分의 어려움(独立的인 経路)으로 인해 생략하거나 近似化 되었으나, 그 正確性이 문제가 되어 왔다.

따라서 本 研究에서는 相互인접 発電機의 角速度 관계를 이용하여, 過渡에너지 函数의 伝達콘덕턴스 항을 近似化하는 과정에서 係数 $\beta_{ij}(=\omega_{j+1,j}/\omega_{i+1,i})$를 도입하고, $\sum_{j=1}^{n} M_j = M_o$라 하여 $\omega_{kj} + \omega_{ij} = (2\beta_{ij} - 1)\omega_{ki}$라 놓아 δ와 ω에 대한 에너지函数 $V(\delta, \omega)$의 形態로 표시하면, 식 (8)과 같이 된다.

$$V(\delta,\omega) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n} M_kM_i\omega^2_{ki} + M_o\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}[(C_{ki}\sin\delta^{ss}_{ki} - D_{ki}\cos$$

$$\delta_{ki}^{s2}) \quad (\delta_{ki}^{s2} - \delta_{ki}) + C_{ki}(\cos\delta_{ki}^{s2} - \cos\delta_{ki}) + D_{ki}(\sin\delta_{ki}^{s2} - \sin\delta_{ki})]$$

$$+ 2\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\{D_{ki}\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k,i}}^{n} M_j\beta_{ij} + M_i\right)[\cos\delta_{ki}^{s2}(\delta_{ki}^{s2} - \delta_{ki}) - (\sin\delta_{ki}^{s2} - \sin\delta_{ki})]\} \quad (8)$$

식 (8)의 계산과정을 간략히 하기 위해 $\beta_{ij} \ll 1$ 이므로 β_{ij}를 생략하면, 에너지函數는 식 (9)와 같이 된다.

$$V(\delta,\omega) = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\{\frac{1}{2}M_kM_i\omega_{ki}^2 + M_oC_{ki}[\sin\delta_{ki}^{s2}(A) + Y_{ki}] - (M_o - 2M_i)D_{ki}[\cos\delta_{ki}^{s2}(A) - X_{ki}]\} \quad (9)$$

여기서,

$A = \delta_{ki}^{s2} - \delta_{ki}$

식 (9)의 에너지函數로부터 故障前 安定平衡点 (δ^{s1})에 대한 故障除去 순간(δ^c)의 過渡에너지函數 V_c는 식 (10)과 같이 된다.

$$V_c = V\Big|_{\delta^{s1}}^{\delta^c} = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\{\frac{1}{2}M_kM_i(\omega_{ki}^c)^2 + M_oC_{ki}[\sin\delta_{ki}^{s2}(A_c) + Y_{ki(c)}] - (M_o - 2M_i)D_{ki}[\cos\delta_{ki}^{s2}(A_c) - X_{ki(c)}]\} \quad (10)$$

또한 故障後 安定平衡点 (δ^{s2})에 대한 임의의 (δ^u) 순간의 臨界過渡에너지는 식 (11)과 같이 결정된다.

$$V_{cr.} = V_u = V\Big|_{\delta^{s2}}^{\delta^u} = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\{M_oC_{ki}[\sin\delta_{ki}^{s2}(A_u) + Y_{ki(u)}] - (M_o - 2M_i)D_{ki}[\cos\delta_{ki}^{s2}(A_u) - X_{ki(u)}]\} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)에서

$A_o = \delta_{ki}^{s2} - \delta_{ki}^{o}$

$X_{ki(o)} = \sin\delta_{ki}^{s2} - \sin\delta_{ki}^{o}$

$Y_{ki(o)} = \cos\delta_{ki}^{s2} - \cos\delta_{ki}^{o}$

3. 運動에너지項과 臨界過渡에너지의 補定

過渡狀態에서 運動에너지는 發電機의 狀態와 直接的으로 관련되므로, 이때 發電機의 움직임을 正確히 算定하기 위해 系統內의 全 發電機를 하나로 취급하지 않고, 外乱에 의해 發電機의 位相角이 副過渡기간인 0.1[sec]동안에 初期値의 2배以上으로 動搖하여 곧바로 脫調할 우려가 있는 臨界發電機와 動搖幅이 2배미만인 殘餘發電機의 두 發電機群으로 분리한다음 이를 發電機動搖에 따른 하나의 전체적인 運動에너지항으로 近似化한다.

그리하여 이를 等価慣性定数 M_{eq}와 等価角速度 ω_{eq}로된 1機 無限大母線系統으로 等価化함으로써 運動에너지項의 算定에 正確性을 기했다. 補定된 運動에너지項은 식 (12)와 같이 된다.

$$V_{KE(C)} = \frac{1}{2}M_{eq}(\omega_{eq})^2 \quad (12)$$

여기서,

$M_{eq} = M_{cr.}M_{res.}/(M_{cr.} + M_{res.})$

$\omega_{eq} = (\omega_{cr.} - \omega_{res.})$

(첨자 $cr.$: 臨界, $res.$: 殘餘狀態를 의미한다)

또한 故障除去点 (δ^c)에서 過渡에너지를 흡수할 수 있는 故障後의 에너지는 故障除去点에 대한 임의의 순간 (δ^u)의 에너지 函數 $V\Big|_{\delta^c}^{\delta^u}$로 표시된다.

그런데 식 (11)과 (12)에서 보면 각각의 基準点이 V_c는 故障前 (δ^{s1})이고, V_u는 故障後(δ^{s2})가 되어 基準点이 서로 다르게 된다. 따라서 故障後 임의의 순간(δ^u)에 대한 臨界過渡에너지를 基準点의 차이를 補定하기 위한 교정항 $V_{(cor.)}$를 추가하여 표시하면, 식 (13)과 같이 된다.

$$V\Big|_{\delta^{s2}}^{\delta^u} = V\Big|_{\delta^{s2}}^{\delta^u} - V_{(cor.)} \quad (13)$$

여기서,

$$V_{(cor.)} = V\Big|_{\delta^{s1}}^{\delta^{s2}} = \sum_{k=1}^{n-1}\sum_{i=k+1}^{n}\{M_oC_{ki}[\sin\delta_{ki}^{s2}(A_{s1}) + Y_{ki(s_1)}] - (M_o - 2M_i)D_{ki}[\cos\delta_{ki}^{s2}(A_{s1}) - X_{ki(s_1)}]\}$$

이러한 理論을 디지탈電算機로 시뮬레이션하기 위해 먼저 不安定平衡点 (U.E.P)을 결정하고, 動搖方程式으로 부터 각 發電機의 位相角 δ를 구한다음, 이를 근거로 系統內의 發電機를 臨界, 殘餘의 두 狀態로 구분해서 전체적인 하나의 狀態로 等価化하고, 基準点의 차이를 補定하기 위해 식 (13)과 같이 교정항 $V_{(cor.)}$을 추가하여 過渡에너지 V와 臨界過渡에너지 $V_{cr.}$을 算定함으로서 대략적인 臨界故障除去時間 $t_{cr.}$을 구할 수 있다.

이와같은 계산과정을 그림으로 표시하면 그림 1과 같이 된다.

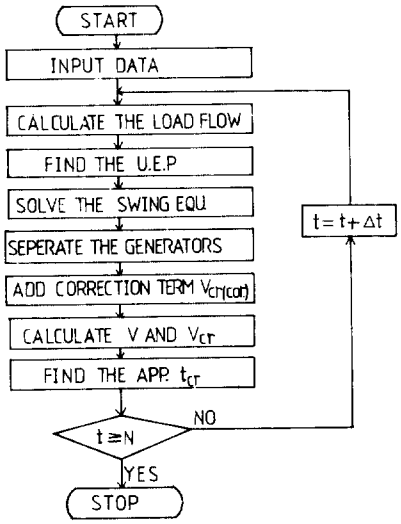


그림 1. 計算過程
Fig.1. Flow chart

4. 모델系統에의 適用事例

4.1 모델系統

지금까지 제시한 理論을 그림 2의 4機 10母線과 그림 3의 9機 27母線의 두 모델系統에 適用시켜 보았다.

먼저 그림 2에서 発電機 1근처 (母線 1) F1点과 母線 6근처 F2点에서 三相短絡事故가 발생한 경우에 대해 分析하였다.

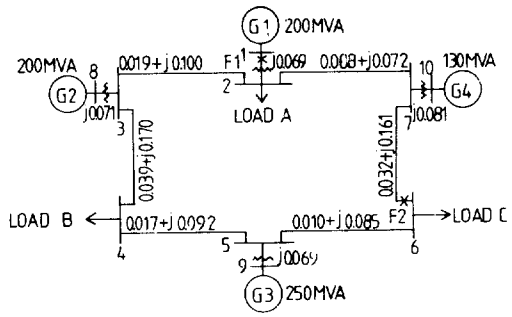


그림 2. 4機 10母線系統(P.U ; 100 MVA BASE)
Fig. 2. 4-Generator 10-Bus sytem
(P.U ; 100 MVA BASE)

또한 그림 3의 発電機 1 (母線 23) 근처 F3点과, 母線 10 근처 F4点에서의 三相短絡事故에 대해 分析하였다.

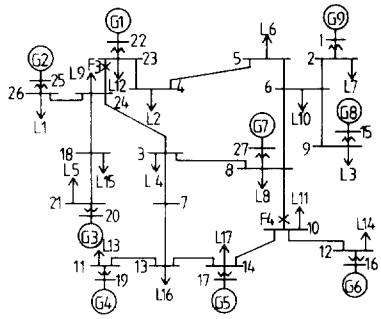


그림 3. 9機 27母線系統(P.U ; 100 MVA BASE)
Fig.3. 9-Generator 27-Bus system
(P.U ; 100 MVA BASE)

4.2 結果分析

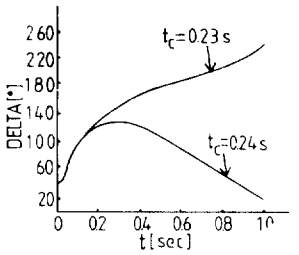
모델系統에서 각 故障点에 의한 臨界過渡 에너지와 故障除去時間에 따른 過渡에너지를 구하면 表 1, 2와 같다.

表 1. 4機 10母線系統의 過渡에너지
Table 1. Transient energy of 4-Generator 10-Bus system

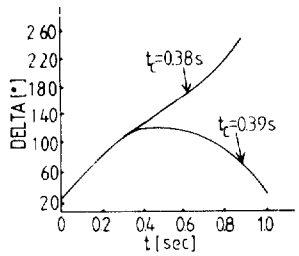
故障點	故障除去時間 tc〔sec〕	過渡에너지 V〔p.u〕	臨界過渡에너지 V_{cr}〔p.u〕
F1	0.23	0.8431	0.8635 (0.9126)
	0.24	0.8740	
	0.25	0.9012	
F2	0.31	1.4213	1.4561 (1.5201)
	0.32	1.4431	
	0.33	1.4842	

( ) ; 교정항 $V_{(cor.)}$이 없는 경우

表 1은 4機 10母線系統에 대한 것으로서, 故障이 F1点에서 발생한 경우, 臨界発電機는 G1이며, G1의 位相角 δ의 時間的変化는 그림 4 (a)와 같고, 臨界過渡에너지는 0.8635〔p.u〕로서, 故障은 0.24〔sec〕以前에 除去되어야 된다. 또한 F2点의 故障인 경우는 臨界発電機가 G4이고, $V_{cr.}$ = 1.4561〔p.u〕로서 臨界故障除去時間은 약 0.325〔sec〕임을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 位相角의 시간적 변화(a) F1 故障點인 경우 G1 發電機 (t_c=0.23s와 0.24s)
(b) F4 故障點인 경우 G7 發電機 (t_c=0.38s와 0.39s)

Fig.4. Swing Curves (a) In case of F1 fault, G1 Gen. (t_C 0.23s and 0.24s)
(b) In case of F4 fault, G7 Gen. (t_C = 0.38s and 0.39s)

表 2. 9機 27母線系統의 過渡에너지

Table 2. Transient energy of 9-Generator 27-Bus system

故障點	故障除去時間 t_c[sec]	過渡에너지 V[p.u]	臨界過渡에너지 Vcr.[p.u]
F3	0.43	8.7263	8.7335 (8.6285)
	0.44	8.7521	
	0.45	8.8014	
F4	0.38	7.3896	7.3901 (7.8701)
	0.39	7.4038	
	0.40	7.4321	

( )교정항 V(*cor*)이 없는경우

表2는 9機 27母線系統의 경우로서, F3点에서 故障이 발생한 경우 臨界發電機는 G1, G2, G3이며, 臨界過渡에너지는 8.7335[p.u]로서, 臨界故障除去時間은 약 0.435[sec]이다. 또한 F4点 故障인 경우는 G5, G6, G7이 臨界發電機이고, G7의 位相角 δ의 時間的変化는 그림4 (b)이며, $V_{cr.}$ = 7.3901[p.u]로 故障은 0.39[sec]以前에 除去되어야 한다.

表 1, 2의 계산치를 段段法에 의한 結果를 基準値(참값)로 하여 종래의 에너지函數[6]에 의한 結果와 비교하면 表3과 같이 된다.

表 3. 각 過渡에너지 函數에 의한 臨界故障除去時間

Table 3. Critical clearing time by each transient energy function

單位 : [sec]

系統	故障點	종래값		참 값		새로운값	
		安 定	不安定	安 定	不安定	安 定	不安定
4機	F1	0.27	0.28	0.18	0.19	0.23	0.24
10母線	F2	0.34	0.35	0.25	0.26	0.32	0.33
9機	F3	0.39	0.40	0.55	0.56	0.43	0.44
27母線	F4	0.45	0.46	0.29	0.30	0.38	0.39

表 3에서 보면 臨界故障除去時間이 모델系統과 故障位置에 따라 차이는 있으나 本 硏究에서 제안한 에너지函數가 종래의 函數보다 더 참값에 접근함을 알 수 있다.

5. 結 論

過渡安定度를 直接法으로 解析하기 위한 보다 개선된 에너지函數를 제안하기 위하여, 伝達콘덕턴스項을 β系數를 도입하여 近似化하였고, 過渡狀態에서의 運動에너지를 正確히 算定하기 위해 系統의 発電機를 臨界와 残餘의 두 狀態로 나누어 解析한 결과, 臨界発電機의 動搖가 全 運動에너지의 대부분을 차지함을 알수 있었다. 따라서 運動에너지 算定時 系統內의 発電機들 중에서 특히 臨界発電機의 動搖에 중점을 두어야 된다고 본다.

또한 臨界過渡에너지 算定時 故障前·後의 基準点에 따른 誤差를 줄이기 위해 補定項을 추가한 결과를 종래의 에너지函數에 의한 結果와 비교하면 4機 10母線의 경우는 약 15[%], 9機 27母線인 경우는 약 16[%]정도로 전반적으로 過渡安定度解析에 正確性을 기할 수 있었다. 그러나 대체로 系統이 커질수록 臨界故障除去時間의 誤差가

커지는데 이는 주로 각 発電機의 運動에너지算定의 不正確性에서 기인된다고 사료된다. 따라서 앞으로 이러한 점을 개선하여 系統의 過渡特性을 더욱 正確히 표시할 수 있는 技法이 요구된다.

끝으로 本 研究는 漢陽大学校 校内 研究費로 이루어졌음을 밝혀둔다.

參 考 文 獻

[1] J.L. Willems ;"Direct methods for transient stability studies in power system analysis." IEEE Trans. AC, vol. AC-16, pp. 332-344. Aug. 1971.

[2] U. Gudaru; "A general Lyapunov function for multi-machine power systems with transfer conductances." Int. J. Control. vol. 21, No. 2. pp. 333-343. 1975.

[3] C.J. Tavora, O.J.M. Smith; "Stability analysis of power systems." IEEE Trans. PAS., vol. PAS-91, pp. 1138-1145. May/June. 1972.

[4] N. Kakimoto, Y. Ohsawa and M. Hayashi; "Transient stability analysis of electric power system via lure type Lyapunov function." Trans. IEEE of Japan, vol. 98, No. 5/6, pp. 62-79. May/June 1978.

[5] F.S. Prabhakara, A.H. El-Abiad; "A simplified determination of transient stability regions for Lyapunov methods." IEEE Trans. PAS., vol. PAS-94, pp. 672-689. March/April. 1975.

[6] T. Atay, R. Podmore and S. Virmani; "A practical method for the direct analysis of transient stability." IEEE Trans. PAS., Vol. PAS-98, pp. 573-584. March/April. 1979.

[7] K. Uemura, J. Matuski, J. Yamada, T. Tsuji; "Approximation of an energy function in transient stability analysis of power system". Electrical Engineering in Japan, Vol. 92, No. 6, pp. 66-100. 1972.

[8] M.A. Pai, P.G. Murthy; "New Lyapunov functions for power system based on minimal relations." Int. J. Control. Vol. 19, No. 2 pp. 401-415. 1974.

[9] S.D. Varwandkar, M.A. Pai; "On the inclusion of transfer conductances in Lyapunov functions for multi-machine power systems." IEEE Trans. AC, Vol. AC-22, No. 6, pp. 983-985. Dec. 1977.

[10] H.F. Williams, S.A. Louie and G.W. Bills; "Feasibility of Lyapunov functions for the stability analysis of electric power systems having up to 60 generators." IEEE Trans. PAS., Vol. PAS -91, No. 3, pp. 1145-1157. May/June. 1972.

[11] M. Mansour; "Generalized Lyapunov function for power system." IEEE Trans. AC, vol. AC-20, No. 3, pp. 247-248. June. 1974.

[12] G. Luders; "Transient stability of multi-machine power systems via the direct method of Lyapunov." IEEE Trans. PAS., vol. PAS-90, pp. 23-36, Jan./Feb. 1971.

[13] Handschin, Real-Time Control of Electric Power Systems, Elsevier Pub. pp. 147-169. 1972.