

Penerapan Metode *Critical Trajectory* dalam Peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) Berbasis Indeks Energi

¹Talitha Puspita Sari, ²Aprilia Rahmayanti, ³Ardyono Priyadi, ⁴Feby Agung Pamuji

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹talithapuspita@gmail.com, ²apriliahmayanti15@mhs.ee.its.ac.id, ³priyadi@ee.its.ac.id,

⁴febyagungpamuji@gmail.com

Abstrak—Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga sinkronisme pada generator selama gangguan. Oleh karena itu, sistem membutuhkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT) berdasarkan respons sudut rotor. Metode *Critical Trajectory* (CTrj) adalah metode untuk perhitungan CCT dengan menggunakan kehilangan sinkronisme (*modified losing synchronism*) sebagai kondisi titik akhir. Pemasangan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) bertujuan untuk memperbaiki CCT agar gangguan dapat dihilangkan sebelum generator terlepas dari sistem. Saat terjadi gangguan, SCES akan merespons sistem dengan menyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG). Pada sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus, CG terletak di generator ke-2. Penelitian ini akan membuktikan adanya peningkatan CCT rata-rata selama 0.01 detik apabila SCES diletakkan pada bus CG.

Kata Kunci—*Critical clearing time, kestabilan transien, super capacitor energy storage.*

Abstract—*Transient stability is the ability of a power system to maintain synchronism of the generators during the disturbance. Therefore, the power system needs the Critical Clearing Time (CCT) refers to the responses of the rotor angle. Critical Trajectory (CTrj) is a method to calculate the CCT uses modified losing synchronism as its endpoint condition. Installing Super Capacitor Energy Storage (SCES) aims to improve the CCT so it will clear the disturbance before the generator is released from the system. When the disturbance happens, SCES will absorb the excess of mechanical power from the Critical Generator (CG). On 3-machine 9-bus Anderson and Fouad system, the CG is located at the 2nd generator. This final project proves the enhancement of average of CCT up to 0.01 second when SCES is placed on the CG bus.*

Keywords —*Critical clearing time, super capacitor energy storage, transient stability.*

I. Pendahuluan

Meningkatnya kebutuhan listrik seiring berjalannya waktu membuat kehidupan sangat bergantung pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, operator diwajibkan untuk mempertahankan kestabilan pada sistem tenaga listrik. Fokus pembahasan pada evaluasi kestabilan ialah respons sudut rotor

pada generator interkoneksi ketika sistem mengalami gangguan transien seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya beban atau generator dari sistem[1].

Saat gangguan transien terjadi pada sistem tenaga listrik maka daya listrik P_e di setiap generator mengalami penurunan dibandingkan dengan daya mekanis P_m sehingga terjadi percepatan pada putaran rotor generator ($P_m > P_e$). Hal ini akan menyebabkan frekuensi listrik f_e yang dihasilkan pada stator tidak sebanding dengan kecepatan putaran rotor generator atau medan magnet putarnya (n_m) [2]. Fenomena tersebut akan menimbulkan sudut rotor δ_1 dan merubah kondisi operasi sistem tenaga listrik dari kondisi normalnya.

Berdasarkan referensi [3], pemasangan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) telah terbukti membantu sistem dalam menjaga kestabilan sudut rotor. SCES merupakan alat penyimpanan energi berkapasitas tinggi yang akan menyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG) saat sistem mengalami gangguan transien. Hal tersebut akan memberikan kesempatan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan sudut rotornya melalui perbaikan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang merupakan waktu kritis untuk pemutusan gangguan.

Penelitian ini akan membuktikan bahwa SCES akan memperbaiki CCT apabila diletakkan pada lokasi yang tepat yaitu di bus CG. Penentuan CG akan didukung oleh metode *BCU Shadowing* berdasarkan perhitungan indeks energi terbesar di setiap generator pada gangguan tertentu [4]. Perhitungan CCT pada generator kritis dilakukan dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*. Dimana, metode tersebut akan memodelkan perilaku sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan hingga mencapai titik kritis sebelum menuju kondisi akhir yaitu kehilangan sinkronisme pada generator.

II. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

A. *Transient Stability Assessment*

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem yang dapat mempertahankan kondisi stabil saat keadaan normal dan mendapatkan kembali kondisi tersebut

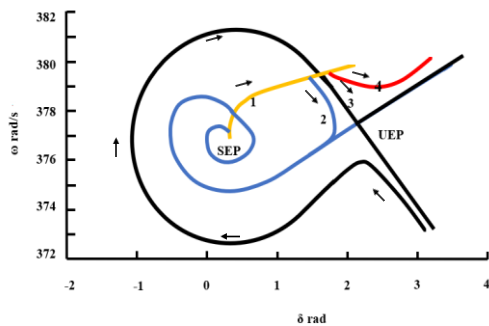
setelah mengalami gangguan [1]. Generator interkoneksi harus beroperasi secara sinkron dengan tegangan dan frekuensi yang sama. Oleh karena itu, penelitian fokus pada kestabilan berdasarkan respons sudut rotor tiap generator saat terjadi gangguan transien.

B. Critical Clearing Time

Apabila sistem mengalami gangguan maka hal tersebut harus segera dihilangkan untuk menghindari kerusakan pada peralatan di sekitarnya dan menjaga stabilitas operasi mesin-mesin. Oleh karena itu, sistem membutuhkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sebagai batas kritis kestabilan. Apabila sistem pengaman dapat beroperasi sebelum nilai CCT maka sistem menjadi stabil. Namun, saat sistem proteksi beroperasi setelah nilai CCT maka sistem menjadi tidak stabil[3]. Nilai CCT harus memiliki waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan waktu operasi *Circuit Breaker* (CB).

C. Critical Trajectory

Lintasan kritis merupakan sekumpulan titik mulai dari *exit point* di lintasan gangguan (*initial point* pada lintasan kritis) x^0 hingga mencapai titik akhir (*endpoint*) x^{m+1} yang memenuhi kondisi *modified losing synchronism*[5].



Gambar 1. Lintasan Sistem *Single Machine* yang Terhubung dengan *Infinite Bus*

Metode *Critical Trajectory* yang digunakan akan menganalisis perilaku dinamis dari suatu sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan hingga pemutusan gangguan. Hal tersebut akan dimodelkan dalam beberapa lintasan yaitu lintasan pertama merupakan lintasan ketika sistem pertama kali mengalami gangguan (*fault-on*). Lintasan kedua untuk kondisi yang stabil dimana gangguan tersebut dapat dihilangkan sebelum generator terlepas. Lintasan ketiga merupakan lintasan kritis yang terletak di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Lintasan keempat adalah lintasan pada saat sistem dalam keadaan tidak stabil.

D. Controlling Unstable Equilibrium Point

Evaluasi indeks energi dilakukan pada CUEP melalui metode *BCU Shadowing*. Metode ini tidak mencari nilai inisial namun mencari titik yang terdekat x^* dengan CUEP. Metode *BCU Shadowing* dengan kriteria *Potential Energy*

Boundary Surface (PEBS) akan mendukung pemilihan *Critical Generator* (CG) berdasarkan nilai indeks energi terbesar dari keseluruhan generator pada titik gangguan tertentu [6].

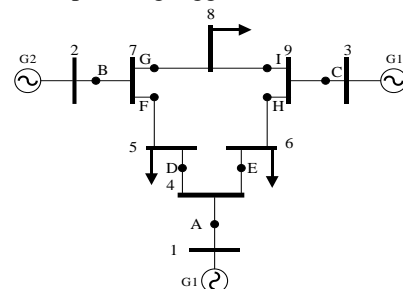
E. Super Capacitor Energy Storage

Super Capacitor Energy Storage (SCES) akan menyediakan kapasitas yang besar untuk menyimpan muatan listrik pada EDLC atau *Electric Double Layer Capacitor*. Energi yang disimpan pada SCES berbanding lurus dengan kerapatan energi atau *energy density*. Walaupun, SCES memiliki kerapatan energi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan alat penyimpanan lain seperti baterai dan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Namun, Ia memiliki kerapatan daya (*power density*) yang tinggi sehingga mampu untuk mengirimkan energi dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu, SCES memiliki *life cycle* yang tinggi sebab durasi *charge* dan *discharge* hanya ditempuh dalam hitungan detik [7].

Pada penelitian ini, SCES diasumsikan dalam keadaan kosong sehingga siap untuk menerima kelebihan daya mekanis dari generator kritis. Sehingga, SCES akan berperan untuk membantu daya elektrik dalam menyeimbangkan kelebihan daya mekanis.

III. Perumusan Masalah

Pencarian *Critical Generator* untuk optimasi peletakan SCES dan perhitungan CCT akan dilakukan pada sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus [8]. Lalu perbandingan nilai CCT dilihat pada sistem tanpa peletakan SCES dengan sistem yang diletakkan SCES. Gangguan yang terjadi pada penelitian ini ialah gangguan tiga fasa. Penambahan SCES akan diuji di beberapa titik gangguan.



Gambar 2. *Single Line Diagram* Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Titik gangguan sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus:

- 1. Titik A : Letak gangguan antara bus 1 dan bus 4
- 2. Titik B : Letak gangguan antara bus 2 dan bus 7
- 3. Titik C : Letak gangguan antara bus 3 dan bus 9
- 4. Titik D : Letak gangguan antara bus 4 dan bus 5
- 5. Titik E : Letak gangguan antara bus 4 dan bus 6

6. Titik F : Letak gangguan antara bus 7 dan bus 5
7. Titik G : Letak gangguan antara bus 7 dan bus 8
8. Titik H : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 6
9. Titik I : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 8

A. *Pemodelan Sistem*

Pemodelan generator interkoneksi pada sistem berdasarkan konsep *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI). COI merupakan sudut yang berasal dari nilai rata-rata berat inersia dari semua sudut rotor dan disimbolkan sebagai δ_0 [4].

Dengan penambahan SCES, pemodelan sistem multimesin dituliskan dalam persamaan ayunan yaitu:

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{m_i} - P_{ei}(\theta) - P_{SCES} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\delta) \quad (1)$$

$$M_T \dot{\omega}_0 = P_{COI} \quad (2)$$

$$P_{ei}(\theta) = \sum_i^n \sum_j^n |E_i E_j Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (3)$$

dimana M adalah konstanta inersia, ω adalah kecepatan sinkron, P_{ei} adalah daya listrik, P_{m_i} daya mekanis, D adalah redaman dan δ adalah posisi rotor.

B. *Modified Trapezoidal*

Metode Trapezoidal merupakan metode integrasi numerik pada lintasan kritis. Lintasan kritis merupakan himpunan titik x^k dengan $k=0$ hingga $m+1$. Maka, metode Trapezoidal akan mengubungkan titik-titik tersebut.

Perumusan masalah

Mula-mula, sistem tenaga listrik beroperasi dengan stabil x_{pre} . Kemudian, gangguan mulai terjadi pada $t = 0$ dan memberikan respons dinamisnya sapaai waktu pemutusan τ .

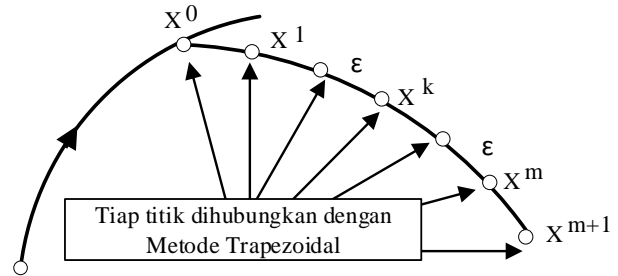
$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (4)$$

Sistem dijelaskan secara dinamis setelah terjadi gangguan dengan persamaan *non-linear*.

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty \quad (5)$$

Kondisi Batasan (Boundary Condition)

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau; x^0 = X_F(CCT; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (6)$$



Gambar 3. Metode Trapezoidal

Notasi x^k berasal dari waktu t^k yang berada pada rumus Trapezoidal konvensional yaitu:

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2} (x^{k+1} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (7)$$

Jarak antara dua titik (ϵ) didefinisikan sebagai berikut:

$$\epsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |x^{k+1} + x^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (8)$$

Rumus modifikasi Trapezoidal[5]:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon = 0 \quad (9)$$

C. *Modified Losing Synchronism*

Metode ini merupakan metode *Losing Synchronism* yang telah dimodifikasi pada kondisi kritisnya. Sistem *single machine* memiliki lintasan kritis yang konvergen dengan *Unstable Equilibrium Point* (UEP) seperti pada gambar 1. Oleh karena itu, metode ini akan mengusulkan penyelesaian dari permasalahan tersebut dengan menganggap bahwa vektor dari *exit point* pada lintasan gangguan selalu searah dengan kondisi titik akhir (*losing synchronism*) maka konstanta skalar $k_s = 1$.

$$\bar{v} = k_s \cdot \dot{\theta} = \dot{\theta} \quad (10)$$

Sehingga didapatkan persamaan sudut rotor sebagai berikut:

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \bar{v} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (11)$$

D. *Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point Shadowing* (BCU Shadowing)

Metode BCU *Shadowing* ialah pendekatan untuk memperoleh CUEP yang tepat dari banyaknya UEP [10]. Sebab, CUEP merupakan lokasi untuk evaluasi indeks energi di tiap generator sehingga hal tersebut sangat berpengaruh terhadap hasil analisis kestabilan transien.

IV. Hasil dan Analisis

Pertama, metode BCU *Shadowing* dijalankan untuk menentukan *Critical Generator* (CG) di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus. CG dipilih berdasarkan konsep perhitungan indeks energi tiap generator. Optimasi peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) dilakukan dengan meletakkan SCES di bus CG dan mengujinya di beberapa titik gangguan. CG yang didapat menjadi salah satu *input* pada metode berikutnya yaitu Metode *Critical Trajectory*. Metode tersebut digunakan untuk perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) sebagai waktu kritis sistem pengaman dalam memutus gangguan. Proses perhitungan CCT dilakukan pada sistem yang tidak diletakkan SCES dengan sistem yang diletakkan SCES. Setelah hasil perhitungan CCT didapatkan lalu hasil tersebut dibandingkan untuk mengetahui seberapa besar penambahan nilai CCT serta respons yang diberikan oleh masing-masing generator setelah dilakukan pemutusan gangguan saat CCT sistem.

A. Penentuan Critical Generator

Pemilihan *Critical Generator* (CG) merupakan subjek utama dalam optimasi peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES). Sebab, SCES akan diletakkan pada bus generator kritis. Oleh karena itu, metode BCU *Shadowing* akan menentukan CG berdasarkan indeks energi[10] di setiap generator pada gangguan tertentu. Generator yang memiliki indeks energi terbesar akan berpotensi menjadi generator kritis. Sebab, indeks energi yang besar pada internal generator akan berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan rotor generator. Sehingga, hal tersebut akan memperbesar sudut rotor dan memperpendek waktu pemutusan gangguan (CCT).

Tabel 1. Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

<i>Fault Point</i>	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Nilai Maks.	CG	CG Sistem
A	0,0137	1,2898	0,5711	1,2898	2	2
B	0,1021	1,6023	0,1066	1,6023	2	
C	0,1328	0,6629	1,7572	1,7572	3	
D	0,0715	1,4907	0,6366	1,4907	2	
E	0,0844	1,5022	0,6186	1,5022	2	
F	0,1269	1,1790	0,4908	1,1790	2	
G	0,1205	1,7431	0,5436	1,7431	2	
H	0,1234	1,2382	0,5482	1,2382	2	
I	0,1264	1,7328	0,6330	1,7328	2	

Saat gangguan A, generator satu memiliki indeks energi sebesar 0,0137 pu, generator dua 1,2898 pu, dan generator tiga 0,5711 pu lalu dari hasil tersebut dipilih generator yang memiliki indeks energi terbesar yaitu generator dua. Setelah

CG tiap titik gangguan telah didapatkan kemudian dipilih CG sistem dari nilai CG yang paling sering muncul di tiap gangguan. Maka, CG sistem 3-generator 9-bus ialah genertor dua.

B. Perhitungan Critical Clearing Time

Perhitungan CCT dilakukan pada sistem tanpa mempertimbangkan *controller* dan *damping* namun memanfaatkan peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) sebagai penyerap daya mekanis berlebih dari generator kritis saat terjadi gangguan. Sebelumnya, metode BCU *Shadowing* telah dilakukan untuk mendapatkan *Critical Generator* (CG) sebagai generator yang memiliki nilai indeks energi terbesar jika dibandingkan dengan generator yang lain. Pada sistem 3-generator 9-bus, CG terletak di generator dua.

Tabel 2.. Perbandingan Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

<i>Fault Point</i>	Metode Numerik		Metode Lintasan Kritis	
	Tanpa SCES	SCES	Tanpa SCES	SCES
A	0.34-0.35	0,36-0,37	0,3419	0,3667
B	0.21-0.22	0,22-0,23	0,2128	0,2289
C	0.25-0.26	0,25-0,26	0,2595	0,2578
D	0.32-0.33	0,34-0,35	0,3260	0,3471
E	0.32-0.33	0,34-0,35	0,3254	0,3464
F	0.22-0.23	0,24-0,25	0,2246	0,2424
G	0.23-0.24	0,24-0,25	0,2317	0,2476
H	0.25-0.26	0,26-0,27	0,2573	0,2623
I	0.26-0.27	0,26-0,27	0,2608	0,2635

Simulasi metode *Critical Trajectory* (Ctrj) dilakukan dengan mengaktifkan satu titik gangguan dalam satu kali perhitungan CCT. Sebab, sistem kelistrikan memiliki probabilitas yang sangat kecil untuk terjadinya lebih dari satu gangguan dalam waktu yang bersamaan (simultan). Gangguan yang dimaksud ialah gangguan tiga fasa.

Metode ini akan menunjuk satu nilai dari rentang *Time Domain Simulation* (TDS) yang telah dimasukkan sebelumnya. TDS didapatkan melalui *trial and error* hingga mendapatkan lintasan stabil, lintasan kritis, dan lintasan tidak stabil. Hasil pada tabel 2 menunjukkan bahwa CCT hampir di semua titik gangguan tidak mencapai waktu ketidakstabilan sistem. Hal tersebut dibuktikan dengan perhitungan error di setiap titik gangguan bernilai nol. Pemasangan SCES pada bus generator kritis dapat meningkatkan CCT rata-rata selama 0,0156 detik. Sehingga, SCES berhasil berperan sebagai beban tambahan yang ikut serta menyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator*.

Gangguan A terjadi antara bus satu dan empat dengan TDS 0,36 detik hingga 0,37 detik. Dimana, sistem tersebut berada pada kondisi stabil sebelum memasuki waktu 0,37 detik. Kemudian, CCT yang didapatkan ialah 0,3667 detik. Maka, sistem berhasil mengisolasi gangguan sebelum generator mencapai kondisi titik akhir yaitu kondisi dimana generator kritis mengalami kehilangan sinkronisme terhadap generator interkoneksi yang lain. Berdasarkan tabel 2, waktu tersebut lebih panjang jika dibandingkan dengan nilai CCT sebelum SCES diletakkan pada sistem yaitu 0,3419 detik dari rentang waktu 0,34 detik hingga 0,35 detik.

Metode *Critical Trajectory* memiliki waktu simulasi yang lebih singkat jika dibandingkan dengan metode numerik. Metode numerik membutuhkan waktu 10 kali lebih lama dimana setiap percobaan membutuhkan waktu selama 20 detik.

V. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) akan diletakkan pada bus generator ke-2 di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus.
2. Peletakan SCES pada bus *Critical Generator* (CG) akan meningkatkan *Critical Clearing Time* (CCT) rata-rata selama 0,0156 detik di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus

VI. Daftar Pustaka

- [1] P. S. Kundur, *Power System Stability and Control*.pdf. University of Toronto, Toronto, Ontario: McGraw-Hill, Inc.
- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth. New York, United States: McGraw-Hill, Inc., 2005.
- [3] T. P. Sari, A. Priyadi, and M. Pujiantara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism," ISITIA Conf., p. 5, 2015.
- [4] A. Priyadi et al., "A Direct Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability using Critical Generator Conditions," *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 22, no. 5, pp. 674–687, Jul. 2012.
- [5] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, and M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1620–1626, Aug. 2010.
- [6] P. E. Hristov, N. Yorino, Y. Zoka, and Y. Sasaki, "Robust Method for Detection of CUEP for Power System Transient Stability Screening," IEEE, 2013.
- [7] J. R. Miller, "Introduction to Electrochemical Capacitor Technology," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2010.
- [8] P. M. Anderson and A.-A. A. Fouad, *Power system control and stability*, 2. ed. Piscataway, NJ: IEEE Press [u.a.], 2003.
- [9] N. Yorino, E. Popov, Y. Zoka, Y. Sasaki, and H. Sugihara, "An Application of Critical Trajectory Method to BCU Problem for Transient Stability Studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4237–4244, Nov. 2013.
- [10] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 2, pp. 573–584, Mar. 1979.