

## Penyadapan Saluran Transmisi dengan Kopling Kapasitif untuk Suplai Daerah Terpencil

Stephanus Antonius Ananda, V. Ari Kusumandoyo  
Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra  
e-mail: ananda@petra.ac.id

### Abstrak

Salah satu alternatif untuk dapat memberikan sumber listrik pada daerah terpencil yang membutuhkan daya relatif rendah dan dilalui oleh saluran transmisi adalah dengan melakukan penyadapan daya yang terdapat pada saluran transmisi dengan menggunakan kopling kapasitif. Kopling kapasitif yang digunakan membentuk suatu pembagi tegangan kapasitif yang berguna untuk menurunkan tegangan dari level tegangan transmisi ke level tegangan distribusi. Pemasangan Induktor yang dihubungkan pada sisi primer dan sisi sekunder transformator distribusi berfungsi untuk mengkompensasi resonansi yang timbul akibat adanya beban kapasitif. Pada tulisan ini dibahas kondisi sistem pada saat terjadi penyadapan baik saat *transient* maupun *steady state* dengan simulasi.

**Kata kunci :** transmisi, kopling kapasitif, pembagi tegangan kapasitif.

### Abstract

*Tapping the transmission lines with capacitive coupling is an alternative to supply the electricity for isolated regions with energy requirement below 50 kW. This option is more economical option compared to other alternatives such as makes substation, long distribution lines or small power house. The capacitive coupling actually a capacitive voltage divider that steps the voltage of transmission level down to the distribution level. Inductor must be connected to primary side and secondary side of the distribution transformer in order to compensate the resonance of capacitive load.*

**Keywords :** transmission, capacitive coupling, capacitive voltage divider

### Pendahuluan

Pada masa sekarang, tenaga listrik sudah merupakan bagian dari kebutuhan pokok masyarakat, baik di perkotaan maupun di pedesaan. Dalam kemajuan pembangunan sarana kelistrikan di tanah air, ditemukan banyak daerah pedesaan yang dilewati saluran transmisi tegangan tinggi tanpa dapat menikmati aliran daya listrik yang besar itu.

Untuk kebutuhan pedesaan dengan daya yang relatif kecil, cara penyadapan konvensional dengan membangun suatu jaringan distribusi primer dengan memasang gardu induk berikut perlengkapannya maupun membangun suatu pembangkit memerlukan biaya yang besar dan

kurang efisien. Oleh karena itu, salah satu alternatif dalam penyediaan daya listrik adalah dengan melakukan penyadapan daya saluran transmisi tegangan tinggi dengan kopling kapasitif. Diharapkan, cara ini dapat lebih efisien dan efektif, karena sistem yang digunakan cukup sederhana.

### Konsep Dasar Penyadapan Daya Saluran Transmisi

Penyadapan daya saluran transmisi yang dimaksud adalah pengambilan sebagian daya yang terdapat pada saluran udara transmisi tegangan tinggi 35 kV sampai dengan 245 kV [1] ataupun saluran udara transmisi tegangan ekstra tinggi di atas 245 kV dengan memanfaatkan keberadaan daya yang diinduksikan oleh kopling kapasitif pada suatu konduktor yang berada di dalam medan listrik saluran udara transmisi.

**Catatan :** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Mei 2001. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 1 nomor 2 September 2001

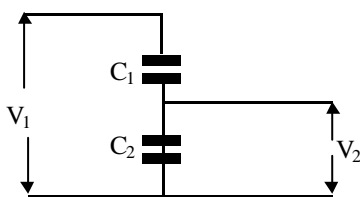
Daya diperoleh dari muatan yang diinduksikan pada suatu bagian kawat tanah saluran udara transmisi yang diisolasi dari strukturnya, sebagaimana yang dilakukan pada kawat fasa saluran distribusi. Peralatan yang digunakan dilengkapi dengan reaktansi induktif untuk mengkompensasi tingginya reaktansi kapasitif yang ekuivalen dengan impedansi internal kawat tanah saluran udara yang juga bernilai tinggi.

Cara penyadapan daya saluran transmisi ini, yang dikenal dengan sistem kopling kapasitif (*Capacitive Coupling System / CCS*), dikembangkan menjadi suatu suplai daya didasarkan pada suatu pembagi tegangan kapasitif yang dihubungkan langsung pada kawat fasa saluran udara transmisi dan merupakan input suatu transformator penurun tegangan.

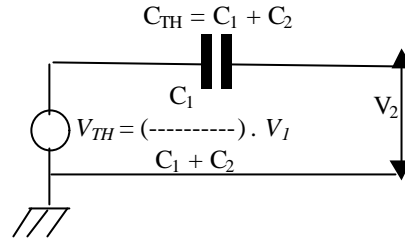
**Penyadapan Daya Saluran Transmisi melalui Kawat Fasa**

Merupakan penyadapan dengan cara memasang suatu pembagi tegangan kapasitif pada kawat fasa untuk menurunkan tegangan level transmisi menjadi tegangan level distribusi untuk kemudian disalurkan ke konsumen. Rangkaian pembagi tegangan terdiri dari dua buah kapasitor yang dihubungkan seperti pada Gambar 1 dan rangkaian ekuivalen Theveninnya dapat dilihat pada Gambar 2. Dari gambar rangkaian tersebut, didapat persamaan berikut :

$$V_{TH} = \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \cdot V_1$$



Gambar 1. Rangkaian Pembagi Tegangan Kapasitif



Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen Thevenin Pembagi Tegangan Kapasitif

**Kondisi Tunak ( Steady State )**

Akibat adanya  $C_{TH}$ , maka impedansi sumber akan tinggi dan  $V_2$  akan sulit diregulasi atau diatur apabila beban bervariasi. Namun, hal ini dapat diatasi dengan menambah induktor yang dihubungkan seri. Induktor yang digunakan sebesar:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C_{TH}}$$

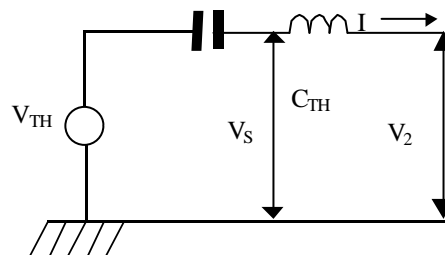
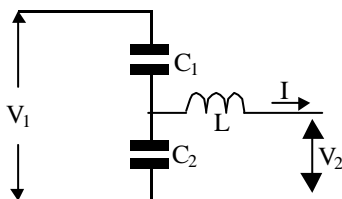
Maka rangkaian dasar dan rangkaian ekuivalen Thevenin menjadi seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Sehingga akan diperoleh persamaan :

$$V_2 = V_{TH} - j\omega LI - I \frac{1}{j\omega C_{TH}}$$

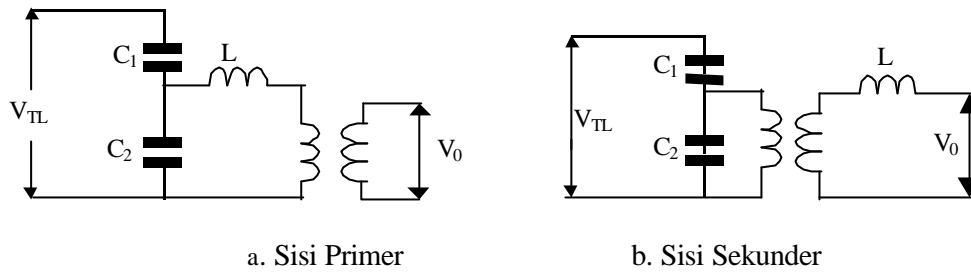
Dengan memasukkan nilai L akan diperoleh :

$$\begin{aligned} V_2 &= V_{TH} - j\omega C_{TH} I - I \frac{1}{j\omega C_{TH}} \\ &= V_{TH} - \left( \frac{1}{j\omega C_{TH}} + \frac{j}{\omega C_{TH}} \right) I = V_{TH} \end{aligned}$$



Gambar 3. Rangkaian Pembagi Tegangan Kapasitif dengan Induktor Seri

Pada kondisi beban penuh :



Gambar 4. Hubungan Induktor dengan Transformator

$$V_3 = V_2 + j\omega L \cdot I_{\text{beban penuh}}$$

dan

$$V_3 = V_{TH} - \frac{1}{j\omega C_{TH}} I_{\text{beban penuh}}$$

Pada kondisi tanpa beban :  $V_3 = V_2 = V_{TH}$ .

Tegangan keluaran  $V_2$  kemudian dihubungkan dengan suatu transformator distribusi untuk menurunkan tegangan dari level distribusi ke level pelayanan 220 V. Induktor regulator atau kompensator dapat dihubungkan pada sisi primer atau sisi sekunder transformator seperti yang tampak pada Gambar 4.

### Kondisi Transient

Masalah utama yang harus diperhatikan pada sistem kopling kapasitif pada kawat yang menggunakan pembagi ini adalah kondisi transient. Kondisi ini akan mempengaruhi desain sistem secara keseluruhan. Berikut ini adalah beberapa simulasi yang telah dilakukan beserta hasilnya.

**1. Simulasi Hubung Singkat.** Dilakukan pada sisi primer transformator dengan suatu induktor atau reaktor yang telah terhubung. Dan pengamatan difokuskan pada tegangan-lebih yang dihasilkan dari simulasi ini.

**2. Simulasi Beban Nol.** Dengan menghitung arus dan tegangan transient, dilakukan analisa kemungkinan timbulnya *feroresonansi* pada transformator yang disebabkan oleh saturasi inti.

Beberapa kasus yang dianalisa diantaranya: (a) efek magnetis residual maksimum; positif dan negatif, (b) efek magnetis residual 50%; positif dan negatif, (c) tegangan puncak rata-rata pada  $C_2$  melewati titik nol.

**3. Simulasi Surja Hubung.** Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pada kondisi rangkaian yang berbeda, dilakukan analisa terhadap tiga kasus berikut: (a) Dalam waktu sesaat, melakukan pembebanan pada sistem dengan tegangan sumber positif maksimum, dimana transformator tidak terhubung. (b) Sama seperti di atas, namun transformator dihubungkan pada sistem dengan kondisi tanpa beban. (c) Penutupan sesaat dilakukan pada sistem dan kemudian diikuti dengan pembukaan, saat tegangan maksimum berada pada polaritas yang berlawanan.

### Desain Sistem

Dalam mendesain suatu sistem, maka terlebih dahulu perlu diketahui parameter-parameter yang mempengaruhi optimalisasi sistem dan cara penghitungan untuk mendapatkan nilai optimumnya. Untuk sistem dengan rangkaian yang menghubungkan induktor pada sisi primer transformator, seperti pada Gambar 4a, penghitungan untuk mendapatkan nilai optimumnya menggunakan persamaan berikut:

$$V_{TH} (V_2) = n \cdot V_0$$

$$D = \frac{V_{TH}}{V_{TL}}$$

$$I_{fullload} = \frac{S}{n \cdot V_0}$$

$$L = \frac{V_{Lmax}}{\omega_{fullload}}$$

$$C_{TH} = \frac{1}{\omega^2 L}$$

$$C_1 = D \cdot C_{TH}$$

$$C_2 = C_{TH} - C_1$$

dimana:

- $V_{TL}$ , tegangan saluran transmisi,
- $V_o$ , tegangan keluaran yang diperlukan,
- $S$ , kapasitas daya keluaran,
- $n$ , rasio lilitan transformator,
- $V_{Lmax}$ , tegangan maksimum inductor  $L$ .

Untuk sistem dengan rangkaian yang menghubungkan induktor pada sisi sekunder transformator, seperti pada gambar 4b, maka persamaan-persamaan untuk mendapatkan nilai optimumnya adalah semua persamaan yang digunakan pada sistem sebelumnya ditambah dengan persamaan-persamaan berikut:

$$L_S = \frac{L}{n^2}$$

$$V_{Lmax} = V_{Tmax} \cdot \sin f$$

$$V_{L_S max} = \frac{V_{Lmax}}{n}$$

dimana:

$$f = \cos^{-1} \frac{nV_o}{V_{Tmax}}$$

Dalam upaya untuk menurunkan arus hubung-singkat dan mengurangi tegangan-lebih pada  $C_1$  dan  $C_2$ , maka pengaman yang digunakan adalah yang tanpa *gaps* dan reaktor atau induktor dipasang pada sisi primer maupun sisi sekunder transformator, agar arus hubung-singkat pada sisi primer berkurang. Suatu *fuse disconnector* satu fasa dapat digunakan sebagai pengaman terhadap gangguan-gangguan yang timbul pada kopling kapasitor  $C_1$  dan juga gangguan yang terjadi di antara terminal dan kopling kapasitif. Untuk melindungi dari gangguan-gangguan pada sisi primer transformator, dapat digunakan suatu *fuse cut-out*.

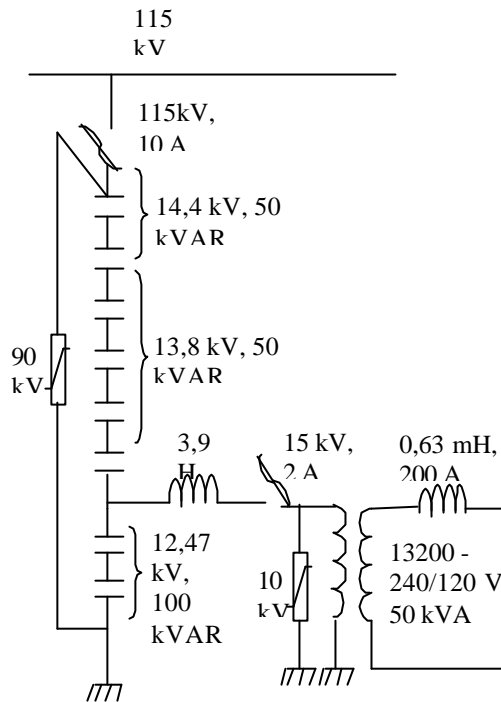
Sebagai pengaman terhadap petir dan tegangan-lebih saat terjadinya gangguan, dapat digunakan *zinc oxide arresters* pada sisi tegangan tinggi maupun sisi tegangan rendah kopling kapasitif

### Simulasi dengan Menggunakan EMTP

Agar dapat mengevaluasi desain sistem terutama respon terhadap kondisi transient, Instituto de Investigaciones Electricas, sebuah lembaga kelistrikan di Mexico, mengadakan simulasi dengan menggunakan bantuan program EMTP

dan test laboratorium .

Simulasi dilakukan pada saluran transmisi bertegangan 115 kV dengan menggunakan 2 kapasitor 50 kVAR 14,4 kV, 4 kapasitor 50 kVAR 13,8 kV, dan 2 kapasitor 100 kVAR 12,47 kV; serta dua induktor kompensator, 3,9 H -3,3 A dan 0,63 mH – 200 A, yang dihubungkan pada sisi primer dan sekunder transformator distribusi 13.200 kV / 240/120 V – 50 kVA.



Gambar 5. Rangkaian Sistem pada Simulasi EMTP

Masalah utama yang harus diperhatikan dari pembangunan instalasi Sistem Kopling Kapasitif ini salah satunya adalah kondisi transien sistem. Agar dapat mengevaluasi desain sistem dan memilih peralatan pengaman yang diperlukan, Instituto de Investigaciones Electricas, sebuah lembaga kelistrikan di Mexico, mengadakan simulasi dengan menggunakan bantuan program EMTP dan test laboratorium.

Simulasi hubung-singkat dilakukan pada sisi tegangan rendah kopling kapasitif atau sisi primer transformator distribusi. Tegangan-lebih yang dihasilkan dari simulasi ini besarnya mendekati 10 kali tegangan nominalnya, walaupun sistem pengaman yang digunakan beroperasi sangat cepat. Beberapa upaya dilakukan untuk mengurangi nilai tegangan-lebih tersebut. Solusi akhir yang ditempuh adalah dengan mengguna-

kan dua induktor kompensator, yang satu dihubungkan pada sisi tegangan rendah kopling kapasitif atau sisi primer transformator distribusi dan yang lainnya pada sisi tegangan rendahnya atau sisi beban. Tegangan-lebih yang timbul pada kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  bernilai maksimal 1,2 p.u. dan 1,28 p.u. dari nilai rating tegangannya, dan mempunyai bentuk gelombang osilasi *underdamped*. Simulasi beban nol bertujuan untuk mengetahui unjuk-kerja sistem saat transformator distribusi tidak dibebani. Dan nilai tegangan yang melewati kapasitor  $C_2$  adalah 12,85 KV. Simulasi Surja-Hubung Kopling Kapasitif bertujuan untuk mengetahui unjuk-kerja kapasitor kopling akibat terjadinya surja-hubung pada tiga kondisi yang berbeda:

- (a) menghubungkan kapasitor kopling dengan sumber tegangan bernilai positif maksimum dalam waktu singkat, dimana sistem tidak terhubung dengan transformator distribusi;
- (b) menghubungkan kapasitor kopling dengan sumber tegangan bernilai positif maksimum dalam waktu singkat, dimana sistem terhubung pada transformator distribusi dengan beban-nol;
- (c) penutupan dan pembukaan hubungan kapasitor kopling dalam waktu singkat, dengan tegangan maksimum berlawanan polaritas.

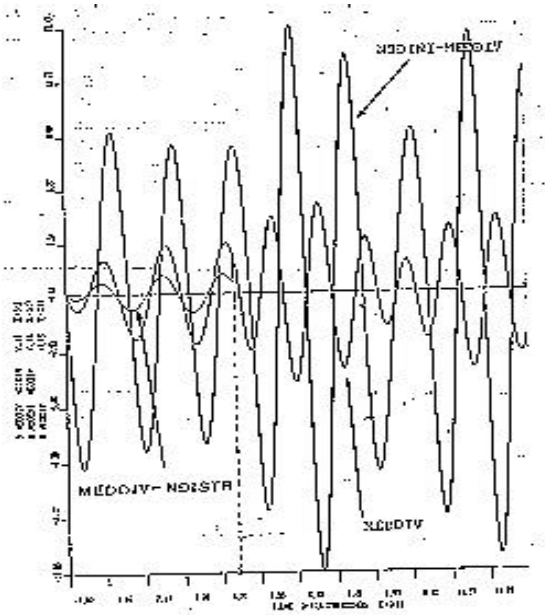
Diketahui bahwa hanya pada kondisi terakhir, tegangan-lebih yang timbul dapat membahayakan kapasitor  $C_1$ . Oleh karena itu, sistem sebaiknya tidak mempergunakan peralatan penutupan otomatis (*automatic recloser*).

Setelah keseluruhan sistem didesain dan dianalisa dengan menggunakan simulasi program komputer, kemudian dibangun prototipenya. Pada prototipe sistem tersebut dilakukan beberapa tes di laboratorium dengan tujuan:

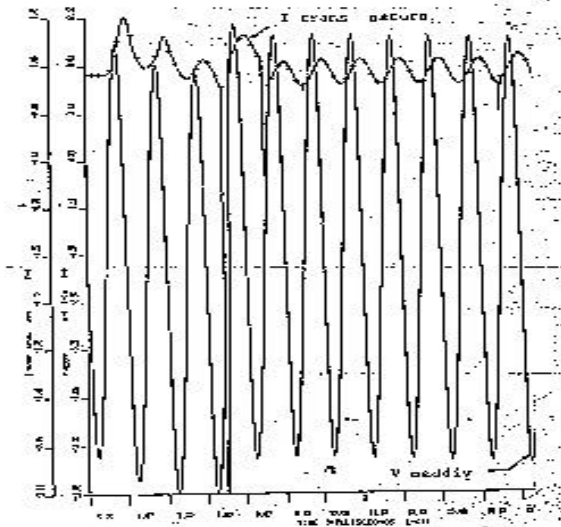
- (a) untuk mengetahui kualitas pelayanan (regulasi tegangan) dan keandalan sistem;

- (b) untuk mengetahui operasionalisasi yang sesuai untuk semua peralatan pada kondisi yang berbeda;
- (c) untuk mengetahui efek-efek membahayakan yang mungkin timbul pada saluran transmisi.

Test hubung singkat pada sisi tegangan rendah kopling kapasitif dilakukan dengan menghubungkan singkat sisi netral induktor kompensator sisi tegangan tinggi atau sisi primer transformator distribusi. Saat terjadi gangguan, kenaikan nilai tegangan transmisi tidak lebih 2% dan gangguan dapat dihilangkan oleh fuse 2 A. Test hubung-singkat pada sisi sekunder transformator distribusi dilakukan dengan cara sisi induktor kompensator pada sekunder transformator distribusi atau sisi beban dihubungkan singkat dengan *ground*.. Fuse 200 A. Dipasang pada sisi beban dan *fuse cut-out* 2 A. dipasang pada sisi primer sebagai pengaman. Arus hubung-singkat rata-rata yang timbul pada sisi sekunder mencapai 1.200 A. (rms) dan arus hubung-singkat ini mengakibatkan fuse cut-out 2 A terbuka dalam waktu 0,5 detik. Selama test dilakukan, tegangan rata-rata dari saluran transmisi mencapai 73 kV (rms), 10% lebih besar dari tegangan nominal. Tegangan rata-rata pada sisi primer transformator distribusi dibatasi sebesar 16,5 kV (rms) dengan menggunakan *surge arrester*. Gangguan yang terjadi pada beban diamankan dengan sistem pengaman tersendiri, yaitu fuse atau circuit-breaker yang dipasang pada beban. Tahanan sebesar 7,7 Ohm diletakkan pada jarak 50 m dari transformator distribusi untuk mensimulasikan beban-beban konsumen. Arus hubung-singkat rata-rata yang timbul akibat terjadinya gangguan hubung-singkat pada beban besarnya kurang dari 520 A. (rms) dan fuse yang dipasang pada beban atau konsumen beroperasi dalam waktu kurang dari 3 cycle. Tegangan-lebih rata-rata pada sisi primer transformator distribusi juga mencapai 16,5 kV (rms).



Gambar 6. Tegangan – Lebih Akibat Hubung – Singkat pada Sisi Primer

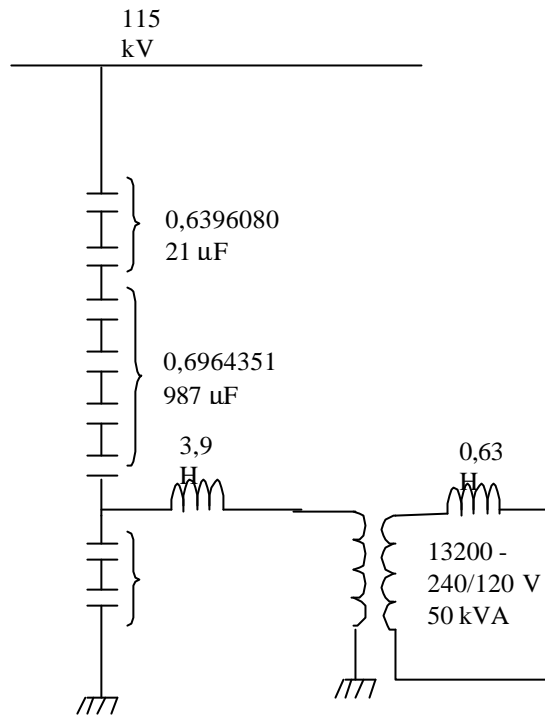


Gambar 7. Tegangan dan Arus Saat Transformator Berbeban Nol

### Simulasi Menggunakan Pspice

Nilai besaran yang digunakan pada simulasi menggunakan Pspice sama dengan nilai besaran yang digunakan pada simulasi menggunakan EMTP, sub bab sebelumnya. Namun karena adanya perbedaan variabel, maka nilai besaran untuk kapasitor diubah dalam satuan Farad. Sehingga untuk kapasitor 50 kVAR - 13,8 kV

digunakan nilai 0,639608021  $\mu\text{F}$ ; kapasitor 50 kVAR – 14,4 kV digunakan nilai 0,6964351987  $\mu\text{F}$ ; dan kapasitor 100 kVAR – 12,47 kV digunakan nilai 1,705830889  $\mu\text{F}$ . Skema rangkaiannya dapat dilihat pada Gambar 8.

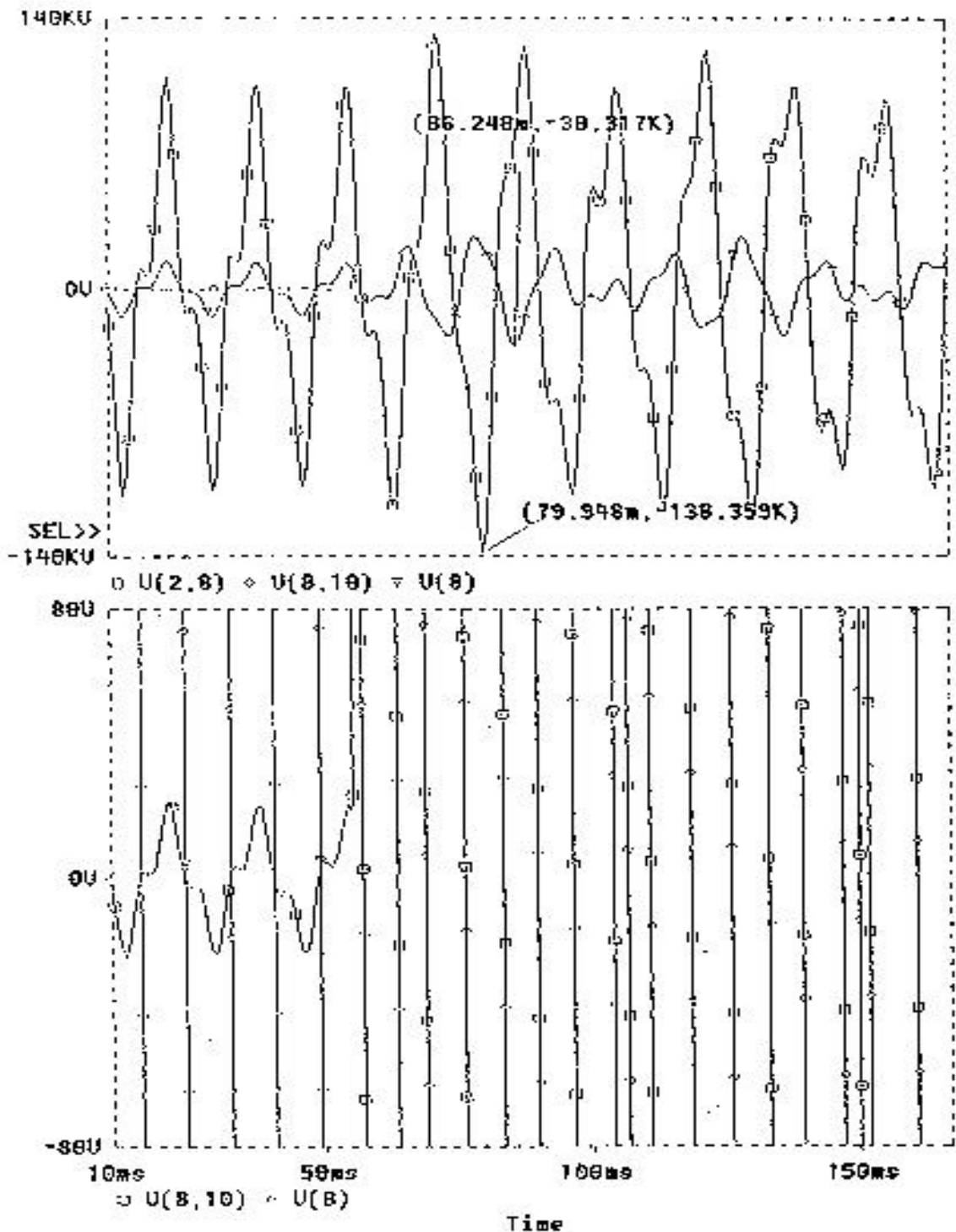


Gambar 8. Rangkaian Sistem Pada Simulasi Pspice

Dari simulasi hubung-singkat pada sisi tegangan rendah kopling kapasitif. Nilai tegangan-lebih yang timbul pada kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  adalah sebesar 138,359 kV dan 30,31 kV, dengan bentuk gelombang osilasi underdamped. Apabila nilai tegangan nominal pada kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  adalah 115 kV dan 24,94 kV; maka nilai tegangan-lebih yang timbul sama dengan 1,2031 p.u.  $\approx$  1,20 p.u. dan 1,2153 p.u.  $\approx$  1,22 p.u. Grafik hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 9. Dari simulasi beban nol. Nilai maksimum tegangan pada  $C_2$  saat transformator diberi beban nol adalah sebesar 12,459 kV. Grafik dan output hasil simulasi beban nol ini dapat dilihat pada Gambar 10.

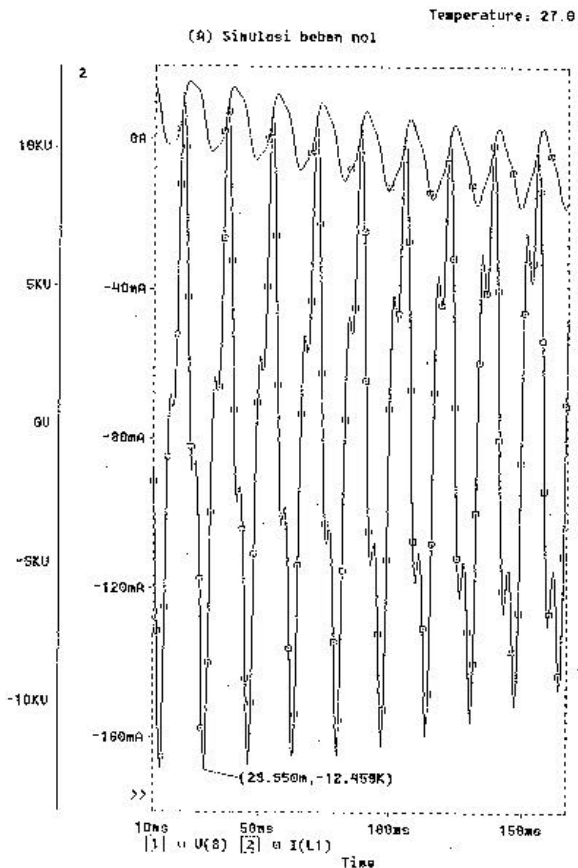
Temperature: 27.0

(F) Simulasi hubung-singkat pada sisi primer



Gambar 9. Simulasi Hubung Singkat Pada Sisi Primer

Gambar 10. Simulasi Beban nol



### Kesimpulan

1. Sistem kopling kapasitf adalah suatu cara untuk mendapatkan daya dari saluran transmisi dengan menurunkan tegangan transmisi ke tegangan distribusi primer berdasarkan prinsip pembagi tegangan. Tegangan yang diperoleh bersifat kapasitif, maka perlu dikompensasi dengan induktor agar diperoleh pengaturan tegangan yang baik pada outputnya.
2. Sistem kopling kapasitif ini perlu dilengkapi dengan peralatan pengaman yang cukup memadai, agar tidak berpengaruh besar terhadap saluran transmisi apabila terjadi gangguan pada sistem kopling kapasitif.

### Daftar Pustaka

- [1]. \_\_\_\_\_."Capasitor Bank Used to Power Remote Loads Can Be a Headache", Electrical World, May 15, 1971.
- [2]. B.G. Checo International. Capacitive Coupling Supply. International Promotion Service, Canada
- [3]. Fink, Donald G. & Beaty, H. Wayne. Standard Handbook For Electrical Engineer. 12<sup>th</sup>ed. MacGraw Hill, Singapore, 1987
- [4]. Hutauruk, T.S. Transmisi Daya Listrik. Penerbit Erlangga, Jakarta 1993
- [5]. Kusnetsov, M. Fundamental of Electrical Engineering. Peace Publisher, Moscow.
- [6]. Maruvada, P. Sarma and Harbec, G. "Capacitance Power Tap-Off From Transmission Lines Using Ground Wires: Calculation of Equivalent Circuit Parameters", IEEE Transaction On Power Apparatus & Systems. Vol. PAS-97, no 4 July/Aug. 1978.
- [7]. Rashid, Muhamad H. Spice for Circuits And Electronics Using Spice. 2<sup>nd</sup> ed, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [8]. Sarmiento, H.G., "Solving Electric Energy Supply to Rural Areas: The Capacitive Voltage Divider" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 5, No. 1 Jan 1990.
- [9]. Soedirman, Soemarto. "Penyadapan Daya Saluran Transmisi Dengan Kopling Kapasitif, Energi & Listrik", 1989-1, LMK 1989.
- [10]. Stevenson, William D., Jr. Elementary of Power System Analysis. 4<sup>th</sup> ed., McGraw Hill, Singapore, 1989.
- [11]. Tuinenga, Paul E., Spice: A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using Pspice. 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [12]. Wilde, R.L. and Carr, J., "Customer Service Direct From Transmission Lines", IEEE Transaction On Power Apparatus & System, Vol. Pass-99 No.1 Jan/feb 1980.