Teknik Tenaga Listrik

Minggu 2 (Bab 2): Kopel Magnetik & Transformator 1-Fasa

Prinsip Trafo Ideal & Nyata, Rangkaian Ekuivalen, Pengujian OC/SC, Efisiensi & Regulasi Tegangan

Novalio Daratha, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Studi S-1 Teknik Mesin (Semester 3 – Ganjil)
Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu

Tahun Akademik 2026



Peta Bahasan Perkuliahan Minggu 2 (CPMK 1 – Bobot 5%)

1. Prinsip Kerja & Konstruksi Transformator
2. Persamaan GGL & Transformator Ideal
3. Rangkaian Ekuivalen Transformator Nyata
4. Pengujian Transformator: Open-Circuit & Short-Circuit
5. Efisiensi & Regulasi Tegangan



Capaian Pembelajaran Perkuliahan Minggu 2 (CPMK 1)

Setelah menyelesaikan perkuliahan Bab 2 ini, mahasiswa mampu:

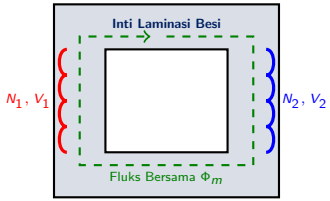
1. **C1 (Mengingat):** Menyebutkan konstruksi utama trafo (inti core/shell, belitan tembaga, pendingin) dan rumus dasar GGL trafo.
2. **C2 (Memahami):** Menjelaskan prinsip refleksi impedansi beban dan perbedaan rangkaian ekuivalen trafo ideal vs. nyata.
3. **C3 (Menerapkan):** Menghitung rasio transformasi (a), tegangan, arus, dan impedansi terrefleksi ($Z_1' = a^2 Z_2$).
4. **C4 (Menganalisis):** Menentukan parameter rangkaian ekuivalen (R_{eq}, X_{eq}, R_c, X_m) dari data uji beban nol (*open-circuit*) dan hubung singkat (*short-circuit*).
5. **C5 (Mengevaluasi):** Mengevaluasi efisiensi (η) dan regulasi tegangan (VR) pada berbagai beban faktor daya (lagging, unity, leading).
6. **C6 (Merancang):** Merancang spesifikasi dasar trafo step-down mesin las busur listrik (*arc welding*) industri.



Definisi & Konstruksi Transformator

Transformator: Mesin listrik statis yang memindahkan daya listrik bolak-balik (AC) antar rangkaian dengan mengubah level tegangan dan arus pada frekuensi tetap.

- **Inti Besi (Core):** Jalur fluks magnetik berkopel tinggi (μ_r tinggi, laminasi 0.35 mm).
- **Tipe Inti:**
  - *Core Type:* Belitan mengelilingi kaki inti.
  - *Shell Type:* Inti mengelilingi belitan (fluks bocor lebih kecil).
- **Belitan (Windings):** Tembaga berisolasi email (*Primary* & *Secondary*).
- **Pendingin:** Udara alami (trafo kering) atau minyak transformator (trafo distribusi tenaga).



Persamaan Fundamental GGL Induksi Transformator

Fluks sinusoidal bersama di dalam inti:

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t) \tag{1}$$

Berdasarkan Hukum Faraday, GGL induksi sesaat:

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos(\omega t) \tag{2}$$

Nilai efektif (RMS) tegangan GGL induksi:

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} \implies \mathbf{E_1 = 4.44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m} \tag{3}$$

Demikian pula pada sisi sekunder:

$$\mathbf{E_2 = 4.44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m} \tag{4}$$

Rasio Transformasi (a)

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{5}$$

- $a > 1$: Trafo **Step-Down** ($V_1 > V_2$, $I_1 < I_2$).
- $a < 1$: Trafo **Step-Up** ($V_1 < V_2$, $I_1 > I_2$).

Daya Semu Trafo Ideal

$$S_1 = V_1 I_1 = V_2 I_2 = S_2 \quad [\text{VA}] \tag{6}$$

Transformator **tidak mengubah besaran daya**, hanya mentransformasikan rasio tegangan dan arus!

Refleksi Impedansi Beban pada Trafo Ideal

Konsep Pemindahan Impedansi

Sebuah beban $Z_L = V_2/I_2$ di sisi sekunder dapat dilihat dari sisi primer sebagai impedansi ekuivalen Z_1':

$$Z_1' = \frac{V_1}{I_1} = \frac{aV_2}{I_2/a} = a^2 \left(\frac{V_2}{I_2} \right) = \mathbf{a^2 \cdot Z_L} \quad (7)$$

Aturan Refleksi Impedansi

- Dari Sekunder ke Primer: **Kalikan dengan** a^2.
- Dari Primer ke Sekunder: **Bagi dengan** a^2.

Aplikasi: Pencocokan Impedansi (*Impedance Matching*)

Dalam industri mesin, refleksi impedansi digunakan untuk:

- Menyesuaikan impedansi busur las resistansi ke sumber jala-jala.
- Memaksimalkan transfer daya pada sensor ultrasonik / NDT (*Non-Destructive Testing*).



Rangkaian Ekuivalen Trafo Nyata Lengkap

Faktor Ketidakidealan Trafo Nyata:

1. **Resistansi Belitan (R_1, R_2):** Menyebabkan rugi tembaga I^2R (panas).
2. **Reaktansi Bocor (X_1, X_2):** Fluks bocor yang tidak mengait kedua belitan (Φ_{l1}, Φ_{l2}).
3. **Cabang Eksitasi Magnetisasi (R_c, X_m):**
   - R_c: Mewakili rugi inti besi (histeresis & arus pusar).
   - X_m: Reaktansi magnetisasi untuk membangkitkan fluks bersama di inti.

Rangkaian Ekuivalen Disederhanakan

Dipindahkan ke sisi Primer:

$$R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2 \quad (8)$$

$$X_{eq1} = X_1 + a^2 X_2 \quad (9)$$

$$Z_{eq1} = R_{eq1} + jX_{eq1} \quad (10)$$

Pengujian Laboratorium: Uji Beban Nol & Hubung Singkat

1. Uji Beban Nol (*Open-Circuit Test*)

- Sisi tegangan tinggi dibuka, instrumen dipasang di sisi tegangan rendah.
- Diukur: $V_{oc} = V_{\text{rated}}, I_{oc}, P_{oc}$.
- Mengukur **Rugi Inti Besi ($P_{core} \approx P_{oc}$)**.
- Menentukan parameter cabang eksitasi (R_c, X_m):

$$\cos\theta_{oc} = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}}, \quad R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}}, \quad X_m = \frac{V_{oc}}{I_m} \tag{11}$$

2. Uji Hubung Singkat (*Short-Circuit Test*)

- Sisi tegangan rendah dihubung singkat, tegangan sangat rendah di sisi tinggi ($V_{sc} \approx 5 - 10\%$).
- Diukur: $V_{sc}, I_{sc} = I_{\text{rated}}, P_{sc}$.
- Mengukur **Rugi Tembaga Beban Penuh ($P_{cu} \approx P_{sc}$)**.
- Menentukan R_{eq} dan X_{eq}:

$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}, \quad Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}, \quad X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \tag{12}$$

Efisiensi & Regulasi Tegangan Transformator

1. Efisiensi Transformator (η)

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{rugi}}} = \frac{V_2 I_2 \cos\phi}{V_2 I_2 \cos\phi + P_{\text{core}} + I_2^2 R_{eq2}} \tag{13}$$

Efisiensi maksimum (η_{max}) terjadi saat:

$$\mathbf{P}_{\text{core}} = \mathbf{P}_{\text{cu}} = \mathbf{I_2^2 R_{eq2}} \tag{14}$$

Rugi besi sama dengan rugi tembaga!

2. Regulasi Tegangan (VR)

Perubahan tegangan terminal saat beban dilepas:

$$VR = \frac{|V_{2,\text{NL}}| - |V_{2,\text{FL}}|}{|V_{2,\text{FL}}|} \times 100\% \tag{15}$$

Pendekatan:

$$VR \approx \frac{I_2(R_{eq2}\cos\phi \pm X_{eq2}\sin\phi)}{V_{2,\text{FL}}} \times 100\% \tag{16}$$

($+$ untuk lagging, $-$ untuk leading).



Aplikasi Industri Mesin: Trafo Las Listrik & Trafo Kontrol

Trafo Mesin Las Listrik (*Welder*)

- Transformator **Step-Down Arus Sangat Tinggi**: Input 380 V $\rightarrow$ Output $20 - 40$ V, Arus $100 - 500$ A.
- Didesain dengan **reaktansi bocor tinggi** (*drooping characteristic*) untuk menstabilkan busur nyala api dan mencegah arus hubung singkat merusak trafo saat elektroda menyentuh benda kerja.

Trafo Kontrol Mesin Perkakas / CNC

- Menurunkan tegangan jala-jala 380 V/220 V menjadi tegangan aman 24 V AC/DC atau 110 V.
- Memberikan **isolasi galvanis** untuk melindungi mikrokontroler, PLC, dan operator dari bahaya sengatan listrik.



Ringkasan Bab 2 & Rujukan Pembelajaran

Poin Kunci Minggu 2

- Transformator bekerja atas dasar induksi bersama Faraday dengan GGL $E = 4.44 f N \Phi_m$.
- Rasio transformasi mengatur tegangan (V), arus (I), dan refleksi impedansi ($Z_1' = a^2 Z_2$).
- Uji OC mengukur rugi inti (P_{core}), uji SC mengukur rugi tembaga (P_{cu}).
- Efisiensi trafo industri sangat tinggi ($> 95 - 98\%$), mencapai puncak saat $P_{core} = P_{cu}$.

Pustaka Acuan: Stephen J. Chapman, Bab 2 (Transformers) & Yon Rijono, Bab 2.