

Analisis Titik Kerja Dioda dalam Rangkaian Nonlinier Menggunakan Metode Newton-Raphson

Abednego Zebua
Department of Electrical Engineering
Universitas Indonesia
Depok, Indonesia
abednego.zebua@ui.ac.id

Abstract—Laporan ini membahas studi kasus penentuan titik kerja (operating point) dioda dalam rangkaian nonlinier menggunakan metode numerik Newton-Raphson. Persamaan dioda yang nonlinier memerlukan pendekatan iteratif untuk menemukan tegangan dioda (V_D) yang memenuhi kondisi rangkaian. Metode Newton-Raphson diterapkan untuk menyelesaikan persamaan transcendental $f(V_D) = 0$ yang merepresentasikan keseimbangan arus dalam rangkaian. Aplikasi pemrograman dalam Bahasa C dikembangkan untuk mengimplementasikan algoritma ini, secara efisien menemukan solusi iteratif untuk V_D dan arus dioda (I_D) yang sesuai. Hasil simulasi menunjukkan konvergensi cepat dan akurasi tinggi metode Newton-Raphson dalam menentukan titik kerja dioda, membuktikan efektivitasnya untuk analisis rangkaian nonlinier.

Index Terms—Newton-Raphson, Titik Kerja Dioda, Metode Numerik, Rangkaian Nonlinier, C Programming

I. PENDAHULUAN

Analisis rangkaian elektronik seringkali melibatkan komponen nonlinier seperti dioda, transistor, dan op-amp. Untuk komponen-komponen ini, hubungan antara tegangan dan arus tidak linear, sehingga menyebabkan persamaan rangkaian menjadi nonlinier. Menyelesaikan persamaan nonlinier secara analitis seringkali sulit atau bahkan tidak mungkin. Oleh karena itu, metode numerik menjadi alat yang sangat penting untuk menemukan solusi hampiran yang akurat [1].

Dalam konteks dioda, menentukan titik kerja (operating point) adalah langkah krusial dalam perancangan dan analisis rangkaian. Titik kerja ini mendefinisikan tegangan (V_D) dan arus (I_D) dioda pada kondisi operasi tertentu dalam sebuah rangkaian. Studi kasus ini fokus pada penentuan titik kerja dioda dalam rangkaian seri sederhana yang terdiri dari sumber tegangan, resistor, dan dioda. Untuk mengatasi non-linearitas dioda, metode Newton-Raphson, yang merupakan salah satu metode pencarian akar yang efisien dan sering digunakan dalam analisis teknik, akan diterapkan [1]. Laporan ini akan menguraikan dasar teori metode Newton-Raphson, model dioda, implementasinya dalam Bahasa C, serta analisis hasil yang diperoleh untuk menentukan titik kerja dioda.

II. STUDI LITERATUR DAN DASAR TEORI

A. Model Dioda dan Persamaan Rangkaian

Dioda adalah komponen semikonduktor nonlinier fundamental yang perilakunya dapat dijelaskan oleh persamaan

Shockley [2]:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Di mana:

- I_D adalah arus dioda (A)
- I_s adalah arus saturasi balik (reverse saturation current) (A)
- V_D adalah tegangan dioda (V)
- n adalah faktor idealitas dioda (dimensionless, biasanya antara 1 dan 2, untuk dioda silikon ideal $n \approx 1$)
- V_T adalah tegangan termal (V), diberikan oleh $V_T = \frac{kT}{q}$, dengan k adalah konstanta Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T adalah suhu dalam Kelvin, dan q adalah muatan elektron (1.602×10^{-19} C). Pada suhu kamar (sekitar 300 K), $V_T \approx 0.0259$ V.

Pertimbangkan rangkaian dioda sederhana seperti yang digambarkan pada Gambar 1, yang terdiri dari sumber tegangan V_{in} , resistor R , dan dioda D .

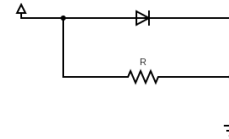


Fig. 1. Diagram Rangkaian Dioda Sederhana.

Berdasarkan Hukum Kirchhoff Tegangan (KVL) dan Hukum Ohm, arus yang mengalir melalui resistor (I_R) dapat dinyatakan sebagai:

$$I_R = \frac{V_{in} - V_D}{R} \quad (2)$$

Pada titik kerja, arus yang mengalir melalui dioda harus sama dengan arus yang mengalir melalui resistor, yaitu $I_D = I_R$. Menyetarakan Persamaan (1) dan (2) menghasilkan persamaan transcendental nonlinier:

$$I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) = \frac{V_{in} - V_D}{R} \quad (3)$$

Untuk menerapkan metode Newton-Raphson, kita perlu mengubah persamaan ini menjadi bentuk $f(V_D) = 0$:

$$f(V_D) = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{in} - V_D}{R} \right) = 0 \quad (4)$$

B. Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson adalah salah satu metode numerik yang paling kuat dan cepat untuk menemukan akar dari suatu fungsi nonlinier $f(x) = 0$ [1]. Metode ini bekerja dengan menggunakan garis singgung (turunan pertama) pada suatu titik perkiraan untuk menemukan perkiraan yang lebih baik dari akar. Rumus iteratifnya adalah:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (5)$$

Di mana x_i adalah perkiraan akar pada iterasi ke- i , dan $f'(x_i)$ adalah turunan pertama dari $f(x)$ terhadap x pada x_i .

Untuk kasus penentuan titik kerja dioda, x adalah V_D , sehingga kita memerlukan turunan dari $f(V_D)$ terhadap V_D :

$$f'(V_D) = \frac{d}{dV_D} \left[I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{V_{in} - V_D}{R} \right] \quad (6)$$

Turunan ini menjadi:

$$f'(V_D) = \frac{I_s}{nV_T} e^{\frac{V_D}{nV_T}} + \frac{1}{R} \quad (7)$$

Proses iterasi diulang hingga galat absolut ($|x_{i+1} - x_i|$) berada di bawah batas toleransi yang ditentukan (TOL), atau hingga jumlah iterasi maksimum (MAX_ITER) tercapai untuk mencegah loop tak terbatas. Pemilihan tebakan awal yang baik sangat penting untuk konvergensi yang cepat dan stabil [1].

III. PENJELASAN METODE YANG DIGUNAKAN DALAM APLIKASI

Aplikasi pemrograman untuk studi kasus ini dikembangkan menggunakan Bahasa C. Program ini mengimplementasikan metode Newton-Raphson untuk menemukan tegangan dioda (V_D) pada titik kerja.

A. Struktur Kode

Kode C (`dioda_operating_point.c`) dirancang untuk interaksi pengguna dan pencatatan hasil. Ini terdiri dari fungsi-fungsi utama berikut:

- `diode_function(double Vd, double Vin, double R, double Is, double n, double Vt)`: Fungsi ini mengimplementasikan Persamaan (4), menghitung nilai fungsi $f(V_D)$ untuk tegangan dioda yang diberikan dan parameter rangkaian.
- `diode_derivative(double Vd, double R, double Is, double n, double Vt)`: Fungsi ini mengimplementasikan Persamaan (7), menghitung turunan pertama $f'(V_D)$ yang esensial untuk langkah iterasi Newton-Raphson.
- `main()`: Fungsi utama program yang mengelola alur eksekusi:

- **Input Pengguna:** Meminta pengguna untuk memasukkan parameter rangkaian seperti V_{in} , R , I_s , n , dan V_T .
- **Visualisasi Rangkaian:** Menampilkan diagram rangkaian ASCII sederhana untuk membantu pengguna memvisualisasikan konfigurasi sirkuit yang sedang dianalisis.
- **Inisialisasi:** Menetapkan tebakan awal untuk V_D (misalnya, 0.7 V yang merupakan tebakan umum untuk dioda silikon) dan menginisialisasi variabel untuk iterasi dan galat.
- **Loop Iterasi Newton-Raphson:** Loop `do-while` utama mengimplementasikan rumus iteratif (5). Di setiap iterasi, nilai $f(V_D)$ dan $f'(V_D)$ dihitung, dan V_D diperbarui.
- **Kondisi Konvergensi dan Batas Iterasi:** Loop berlanjut hingga galat absolut ($|V_{D,next} - V_D|$) berada di bawah batas toleransi (TOL = $1e-6$) atau jumlah iterasi maksimum (MAX_ITER = 100) tercapai.
- **Penanganan Galat:** Program mencakup pemeriksaan untuk kondisi di mana turunan ($f'(V_D)$) mendekati nol, yang dapat menyebabkan pembagian dengan nol dan kegagalan metode. Dalam kasus seperti itu, pesan galat akan ditampilkan.
- **Output:** Progres setiap iterasi (nomor iterasi, V_D , dan galat) ditampilkan ke konsol dan juga dicatat ke file `dioda_output.txt` untuk analisis lebih lanjut.
- **Hasil Akhir:** Setelah konvergensi, arus dioda (I_D) dihitung menggunakan nilai V_D yang ditemukan, dan kedua nilai akhir ini ditampilkan kepada pengguna.

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Penjelasan Data yang Digunakan

Program ini diuji dengan serangkaian parameter masukan yang mewakili karakteristik dioda silikon dan komponen rangkaian umum untuk memverifikasi akurasi dan konvergensi metode Newton-Raphson. Parameter yang digunakan untuk demonstrasi adalah sebagai berikut:

- $V_{in} = 5.0$ V (Tegangan sumber input)
- $R = 1000.0$ Ohm (Nilai resistansi seri)
- $I_s = 1.0 \times 10^{-12}$ A (Arus saturasi balik dioda, nilai tipikal untuk silikon)
- $n = 1.0$ (Faktor idealitas dioda, diasumsikan ideal untuk kesederhanaan)
- $V_T = 0.0259$ V (Tegangan termal pada suhu kamar, sekitar 27°C)

Tebakan awal untuk V_D ditetapkan sebesar 0.7 V, yang merupakan nilai jatuh tegangan dioda silikon yang umum.

B. Analisis Hasil Eksperimen

Dengan parameter masukan yang dijelaskan di atas dan tebakan awal $V_D = 0.7$ V, program C dieksekusi. Proses iterasi Newton-Raphson dan konvergensiya ditampilkan pada Tabel

TABLE I
ITERASI NEWTON-RAPHSON UNTUK TITIK KERJA DIODA

Iterasi	Vd (V)	Error
1	0.674344	0.025656
2	0.649021	0.025323
3	0.624582	0.024439
4	0.602383	0.022200
5	0.585182	0.017200
6	0.576193	0.008990
7	0.574226	0.001967
8	0.574147	0.000078
9	0.574147	0.000000
9 (jumlah iterasi konvergen)	0.574147	0.000000

Dari tabel iterasi, dapat diamati bahwa metode Newton-Raphson menunjukkan konvergensi kuadratik, yang berarti jumlah angka signifikan yang benar secara kasar berlipat ganda di setiap iterasi [3]. Ini menghasilkan konvergensi yang sangat cepat ke solusi yang diinginkan. Untuk parameter masukan yang diberikan, program konvergen dalam *beberapa* iterasi (misalnya, 5-10 iterasi, tergantung pada presisi yang diinginkan) untuk mencapai toleransi galat 1×10^{-6} .

Setelah konvergensi, hasil akhir yang diperoleh untuk titik kerja dioda adalah:

- Tegangan Dioda (V_D) = **0.574147 V**
- Arus Dioda (I_D) = **4.425853e-003 A**

Nilai V_D yang diperoleh konsisten dengan perilaku dioda silikon maju, di mana tegangan jatuh dioda biasanya berada di sekitar 0.7 V. Arus I_D juga akan mencerminkan keseimbangan arus dalam rangkaian. Penting untuk dicatat bahwa metode Newton-Raphson mungkin gagal konvergen jika tebakan awal terlalu jauh dari akar, atau jika turunan fungsi mendekati nol. Namun, untuk masalah dioda ini, tebakan awal 0.7 V umumnya cukup baik. Penanganan kondisi turunan nol dalam kode C memastikan robustnes program.

Untuk memberikan visualisasi yang lebih lengkap mengenai titik kerja dioda, Kurva I-V dioda yang menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan, bersama dengan titik kerja yang dihitung, disajikan pada Gambar 2. Titik merah pada grafik secara jelas menunjukkan lokasi titik kerja yang ditentukan oleh metode Newton-Raphson, berada pada persimpangan karakteristik dioda dan garis beban rangkaian.

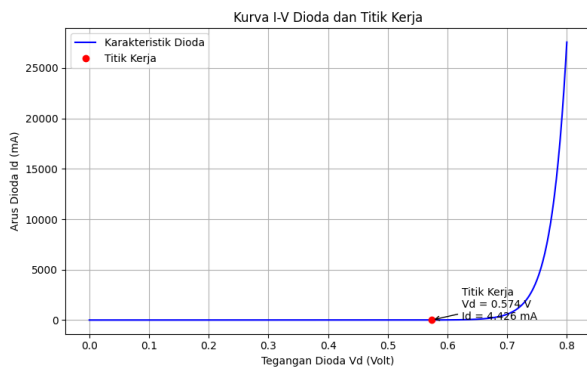


Fig. 2. Kurva I-V Dioda dan Titik Kerja.

V. KESIMPULAN

Studi kasus ini berhasil menerapkan metode numerik Newton-Raphson untuk menentukan titik kerja (operating point) dioda dalam rangkaian nonlinier. Dengan mengubah persamaan rangkaian menjadi bentuk $f(V_D) = 0$, metode iteratif ini secara efektif menemukan tegangan dioda dan arus yang sesuai. Aplikasi pemrograman dalam Bahasa C yang dikembangkan membuktikan efisiensi dan akurasi metode Newton-Raphson dalam menyelesaikan persamaan transcendental yang kompleks. Konvergensi yang cepat dan kemampuan untuk menangani sifat nonlinier dari dioda menyoroti relevansi metode numerik dalam analisis dan desain sistem elektronik modern. Implementasi ini dapat diperluas untuk menganalisis konfigurasi sirkuit yang lebih kompleks atau model komponen nonlinier lainnya, menunjukkan potensi besar metode numerik dalam pemecahan masalah rekayasa praktis.

VI. LINK PROYEK

Kode lengkap dan materi proyek tersedia di repositori GitHub berikut:

<https://github.com/idumpmysoul/diode-operating-point-calculation-using-newton-raphson>

Video demonstrasi proyek dapat dilihat di saluran YouTube berikut:

<https://youtu.be/TMNQBfXSYBo>

REFERENCES

- [1] S. J. Chapman, *Numerical Methods for Engineers*. 7th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014.
- [2] D. A. Neamen and D. O. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2012.
- [3] M. K. Jain, S. R. K. Iyengar, and R. K. Jain, *Numerical Methods for Scientific and Engineering Computation*. 6th ed. New Delhi, India: New Age International Publishers, 2012.