

Desain dan Analisis Pembangkit Tegangan DC Tinggi Tiga Tahap dengan Metode Crocroft - Walton

Setiyono

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Gunadarma, Jakarta

Koresponden email: setiyono@staff.gunadarma.ac.id

Diterima: 28 September 2024

Disetujui: 5 Oktober 2024

Abstract

High DC voltage sources are required in a variety of applications including nuclear measurements, medical equipment (X-rays), corona testers, dielectric strength testing, pulse voltage generation and high voltage electrical resistance testing. Various methods have been developed to produce high DC voltage, including DC-DC converters, boost converters, flyback transformers and Crocroft - Walton. This paper describes a high DC voltage generator using the Crocroft-Walton (CW) rectifier method. This method is based on the principle of converting a low voltage AC wave to a high DC voltage (converter), the level of which is many times the input voltage. The aim of this research is to develop a design for a 12 V DC voltage multiplier to a high DC voltage without a voltage step-up transformer using the CW method using Matlab Simulink tools. The switching control strategy uses two high frequency and low frequency components in the converter circuit. The simulation results show that the input voltage value was successfully doubled to approximately six times, with the highest output voltage value being 4973 V at a pulse width (duty cycle) setting of 0.99 on the converter circuit switch.

Keywords: *crocroft walton, dc voltage multiplier, duty cycle setting*

Abstrak

Sumber tegangan DC tinggi dibutuhkan pada beberapa sektor seperti untuk pengukuran pada teknologi nuklir, peralatan kesehatan (x-ray), peralatan pengujian korona, pengujian kekuatan mekanis dielektrik, pembangkit tegangan impuls dan pengujian ketahanan listrik terhadap tegangan tinggi. Beragam metode dikembangkan untuk menghasilkan tegangan tinggi DC antara lain dengan konverter DC ke DC, *Boost Converter*, *Flyback Transformator* dan Crocroft – Walton. Paper ini memaparkan sebuah pembangkit tegangan DC tinggi menggunakan metode penyearah Crocroft-Walton (CW). Metode ini pada prinsipnya mengubah besaran gelombang bolak balik (AC) tegangan rendah menjadi tegangan DC tinggi yang levelnya berlipat lipatan dari tegangan masukannya. Tujuan penelitian ini adalah membangun disain pengali tegangan DC 12 V menjadi tegangan DC tinggi tanpa transformator penaik tegangan dengan metode CW menggunakan tools matlab simulink. Strategi pengendalian saklar menggunakan dua komponen frekuensi tinggi dan frekuensi rendah pada rangkaian inverter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan input berhasil dilipatgandakan menjadi kurang lebih enam kali dimana nilai tegangan output tertinggi diperoleh sebesar 4973 V pada pengaturan lebar pulsa (Duty Cycle) 0.99 pada saklar rangkaian konverter.

Kata Kunci: *crocroft walton, pengali tegangan dc, pengaturan duty cycle*

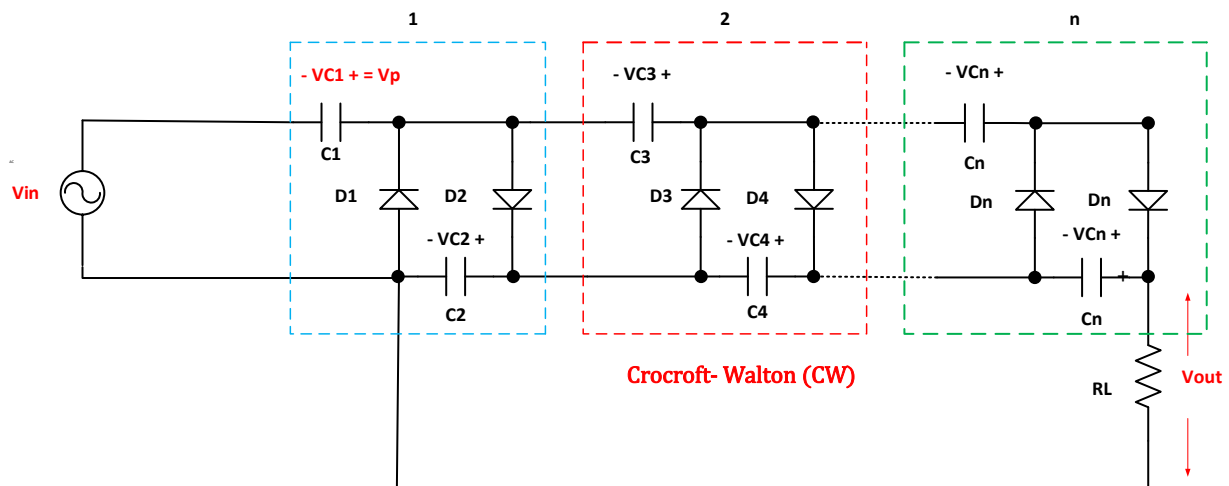
1. Pendahuluan

Penerapan konverter boost dc-dc dalam beberapa tahun terakhir di berbagai bidang telah banyak ditemukan, karena kemampuan untuk meningkatkan input dc tegangan rendah ke level tegangan dc tinggi antara lain pada sistem pembangkit listrik tenaga surya, pembangkit tegangan impuls, sistem pengisian baterai, peralatan mikroskop elektron, sinar X, pengganti booster, raket nyamuk, kendaraan listrik dan pada sistem bahan bakar fuel cell [1], [2],[3], [4]. Namun demikian secara praktis penggunaan elemen induktor, kapasitor, dioda dan saklar dampaknya mengurangi penguatan yang diinginkan [5]. Sampai dengan saat ini banyak metode konverter dc – dc terus dikembangkan untuk mendapatkan rasio tegangan tinggi dengan menggunakan transformator terisolasi maupun reaktor induktor [6].

Akselerator Cockcroft-Walton merupakan konverter daya listrik AC bertegangan rendah menjadi tegangan DC yang levelnya dapat berlipat lipatan kali lebih tinggi dari tegangan puncak sumber dengan menggunakan kapasitor dan diode yang disusun menjadi rangkaian tertentu [7],[8]. Secara fisik pengganda tegangan ini dinilai relatif lebih ringan dibanding dengan dan lebih murah jika dibanding dengan penggunaan transformator. Tegangan di tiap tingkat sama dengan dua kali dari tegangan masukan puncak penyearah setengah gelombang dan pada penyearah gelombang penuh besarnya tiga kali tegangan puncak

masukannya. Adapun kelemahan dari CW ini antara lain adanya riak (ripple) pada setiap peningkatan tahap karena impedansi kapasitif pada tahap yang lebih rendah [9]. Untuk mengurangi ripple dapat memasang filter kapasitor pada sisi keluaran [10]. Sebuah pembangkit tegangan DC tinggi kaskade n level dengan metode Crockcoft Walton (CW) konvensional tampak pada **Gambar 1**. Sebagai sumber tegangan masukan adalah tegangan AC atau bolak-balik yang akan disearahkan oleh sejumlah dioda pada rangkaian pengali tegangan.

Disain ini terdiri dari rangkaian pengali tegangan yang menggabungkan tahapan tangga dioda dan kapasitor dimana setiap level terdiri dari dua dioda dan dua kapasitor. Tegangan keluaran V_{out} pengali Crockcoft Walton n tahap nilainya sama dengan $2n$ kali nilai sumber tegangan V_{in} (ac) dalam keadaan tanpa beban. Besarnya tegangan keluaran dc akan lebih kecil dari nilai secara teori karena sifat komponen yang tidak ideal. Namun demikian, pengaturan tegangan kurang baik ketika CW dalam kondisi beban penuh dan memiliki ripple yang besar dari frekuensi tegangan sumber. Banyak cara untuk mengurangi riak ini diantaranya dengan memasang reaktor induktor penghalus maupun tapis.



Gambar 1. Pengali Pembangkit Tegangan DC Tinggi n Tahap Crockcoft Walton

Prinsip Kerja CW n Tahap

Gambar 1 jika diasumsikan tegangan masukan V_{in} dengan nilai maksimum V_p dengan frekuensi f Hz mencatu rangkaian CW : Ketika periode tegangan masukan pada siklus negatif $-V_p$, arus sumber mengalir melalui dioda $D1$ dan mengisi muatan ke kapasitor $C1$ sebesar V_p . Pada siklus positif, tegangan pada sisi kanan plat kapasitor $C1$ bertambah sebesar $2V_p$ dan $D2$ terbias forward maka mengisi muatan kapasitor $C2$ pada tegangan $2V_p$. Jika V_{in} kembali ke siklus negatif atau berbalik polaritas lagi, kapasitor $C2$ mengalirkan arus listrik melalui dioda $D3$, untuk mengisi muatan kapasitor $C3$ pada tegangan $2V_p$. Kemudian jika V_{in} kembali ke siklus positif periode berikutnya, arus listrik dari $C3$ mengalir melalui dioda $D4$, kapasitor $C4$ juga akan mencapai tegangan $2V_p$. Begitu seterusnya untuk n tahap pengisian kapasitor akan mempunyai proses yang sama dengan tahap sebelumnya.

Nilai tegangan kapasitor pada tiap tangga dapat ditentukan dengan persamaan 1. [11], [12]

$$V_C = \begin{cases} V_P & \text{untuk } k = 1 \\ 2V_P & \text{untuk } k = 2,3,4 \dots n \end{cases} \quad 1$$

Dimana V_P adalah tegangan puncak kapasitor ke k . Nilai tegangan keluaran CW tingkat ke $-n$, besarnya akan sama dengan tegangan total semua kapasitor genap dan dapat dinyatakan dengan persamaan 2 :

$$V_{out} = nV_C \quad 2$$

$$V_{out} = nV_C \\ \text{iy dan } i_L$$

sehingga tegangan kapasitor dapat ditulis

$$V_c = \begin{cases} \frac{V_{out}}{2n} & \text{untuk } k = 1 \\ \frac{V_{out}}{n} & \text{untuk } k = 2,3,4, \dots n \end{cases}$$

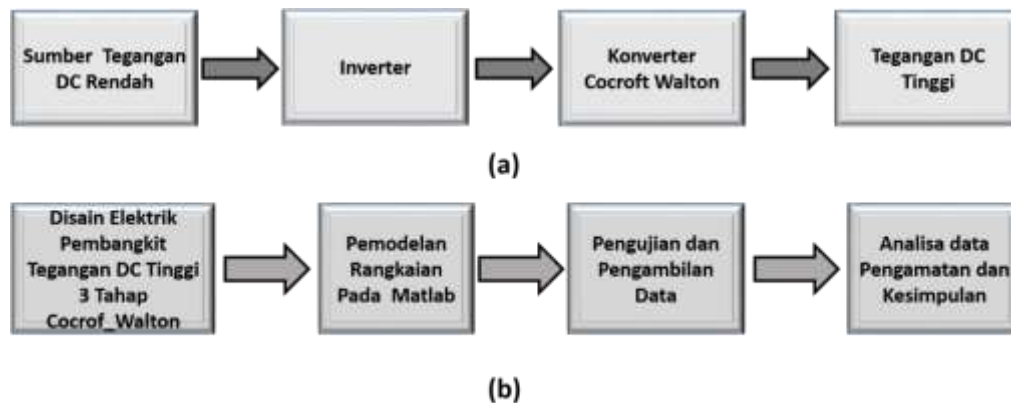
Rangkaian *Cockcroft-Walton* ini mampu membangkitkan tegangan tinggi dc tinggi, akan tetapi secara praktis nilai V_{out} akan selalu lebih rendah dari $2n\sqrt{2} V_{eff}$ hal ini disebabkan adanya jatuh tegangan (*voltage losses*) dioda. Jatuh tegangan ini akan semakin besar selaras dengan bertambahnya jumlah tahap atau tingkatan [13].

Nilai total ripple untuk n tahap di representasikan persamaan 3. [14]

$$2\delta V = q \left[\frac{1}{C_{2n}} + \frac{2}{C_{2n} - 2} + \frac{3}{C_{2n} - 4} + \dots + \frac{n}{C_2} \right] \quad 3$$

2. Metode Penelitian

Ide dasar dan metode penelitian yang diusulkan adalah sebagai berikut :



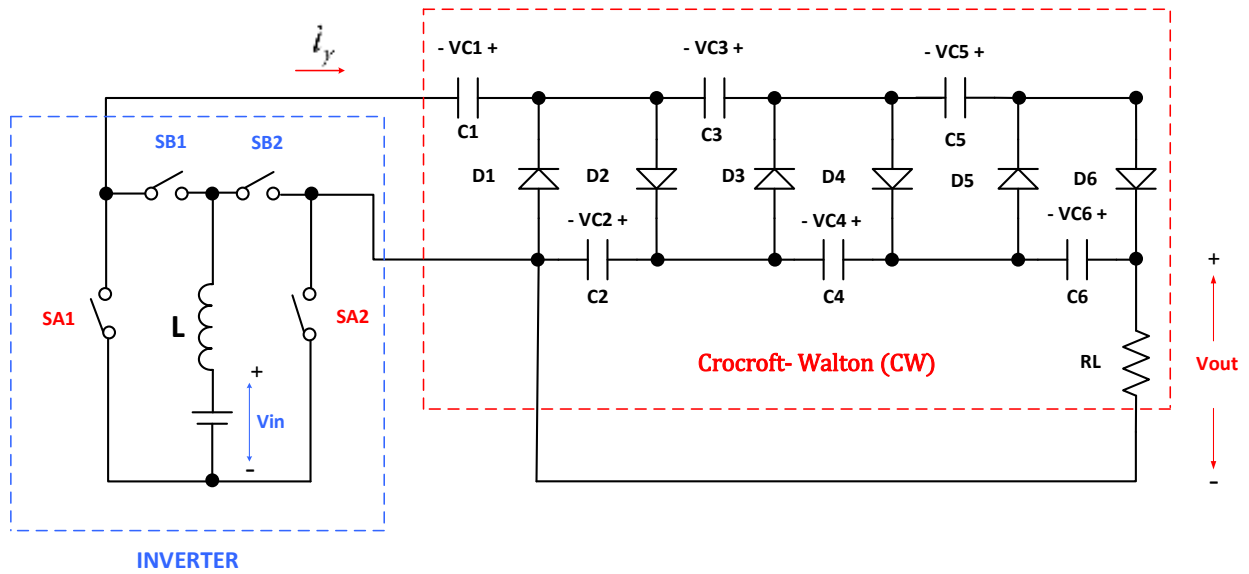
Gambar 2. (a) Ide Dasar dan (b) Alur Penelitian

Gambar 2a adalah konsep dari penelitian yang diusulkan . Untuk memperoleh tegangan DC tinggi melalui beberapa proses yakni sumber tegangan DC level rendah sebagai masukan diubah menjadi tegangan bolak balik menggunakan inverter, kemudian melalui metode Crocroft Walton tegangan ini diubah kembali menjadi tegangan DC tinggi oleh rangkaian penyearah yang berada didalamnya. **Gambar 2b** adalah tahap alur kerja dari riset yang dilakukan . Langkah awal adalah mendisain rangkaian elektrik dan kontrol pembangkit tegangan DC tinggi 3 tahap dengan metode Cocrof Walton. Tahap ini bertujuan untuk menentukan nilai parameter tegangan, daya dan nilai element pendukung seperti kapasitor, dioda, induktor dan jenis saklar semikonduktor yang digunakan.

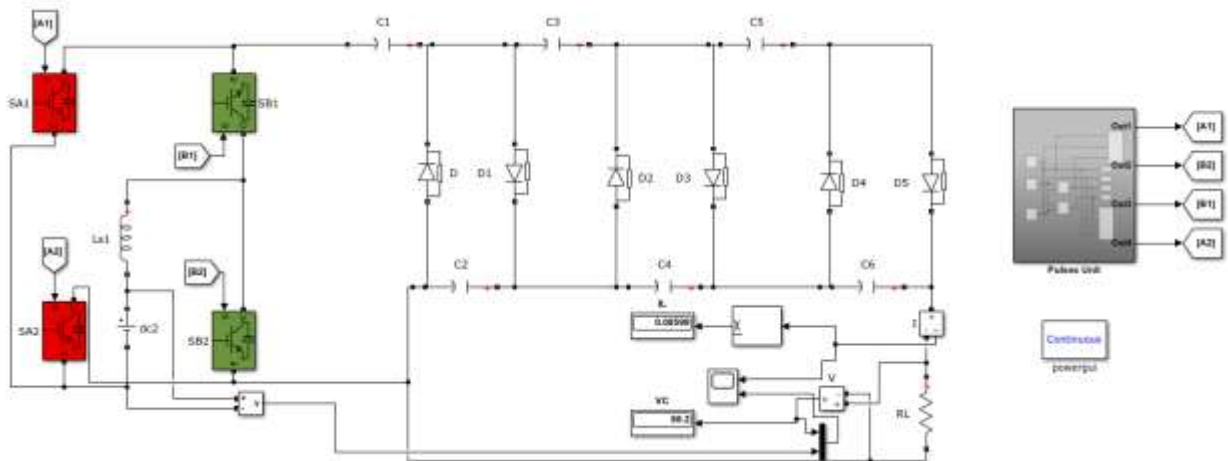
Rangkaian kontrol dirancang untuk menentukan frekuensi pembangkit pulsa penyalan pada operasi saklar inverter. Tahap kedua dan ke tiga adalah membangun pemodelan dari disain elektrik ke dalam simulator matlab dan menjalankan model disain untuk mengetahui data dari parameter yang dibutuhkan. Langkah terakhir adalah menganalisa dan membuat kesimpulan.

Disain Rangkaian Elektrik yang Diusulkan

Gambar 3 adalah sebuah disain pembangkit tegangan DC tinggi menggunakan metode Crocroft Walton yang dirancang terdiri dari 2 bagian utama yaitu inverter dan rangkaian Crocroft Walton. Rangkaian inverter berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi AC terdiri dari 4 buah saklar SA1 SA2 dan SB1 SB2. Saklar ini dapat berupa Transistor, Mosfet atau divais semikonduktor lainnya. Induktor dipasang seri dengan V_{in} sebagai reaktor penguatan. Saklar SA1 Dan SA2 berfungsi untuk pengaturan tegangan keluaran kedua saklar ini dinyalakan dengan sinyal picu frekuensi tinggi. Saklar SB1 dan SB2 digunakan untuk membentuk osilasi perubahan amplitudo tegangan V_{in} menjadi gelombang persegi yang simetris, sehingga menyerupai tegangan kotak bolak balik. Kinerja saklar ini dioperasikan oleh pulsa penyalan frekuensi rendah [15]. Sementara **Gambar 4** merupakan disain pemodelan pembangkit tegangan tinggi DC menggunakan tools matlab simulink.



Gambar 3. Pembangkit tegangan DC tinggi 3 tahap menggunakan metode Crocroft Walton



Gambar 4. Pemodelan pembangkit Tegangan DC Tinggi 3 tahap Menggunakan metode Crocroft-Walton.

3. Hasil dan pembahasan

Inverter

Sebagai sumber tegangan masukan adalah V_{in} berupa tegangan DC 12 V sehingga tegangan ini harus diubah menjadi tegangan AC (bolak balik) oleh rangkaian inverter yang disusun menggunakan saklar transistor SB1 dan SB2. Operasi kerja saklar ini dikendalikan oleh dua buah pulsa picu 1 kHz yang saling komplementer agar diperoleh bentuk tegangan keluaran yang selalu bertolak belakang polaritasnya. Arus yang mengalir pada induktor (L_s) dapat dinyatakan:

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} D}{L_s} \tag{4}$$

Dimana V_{in} adalah tegangan masukan, L_s adalah nilai induktor penguatan, dan D adalah Duty Cycle. Hubungan antara i_γ dan i_L adalah

$$\frac{i_\gamma}{i_L} = 1 - D \tag{5}$$

Pada kondisi statis steady state Gain tegangan inverter dapat dinyatakan dengan :

$$M_V = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{2n}{1 - D} \tag{6}$$

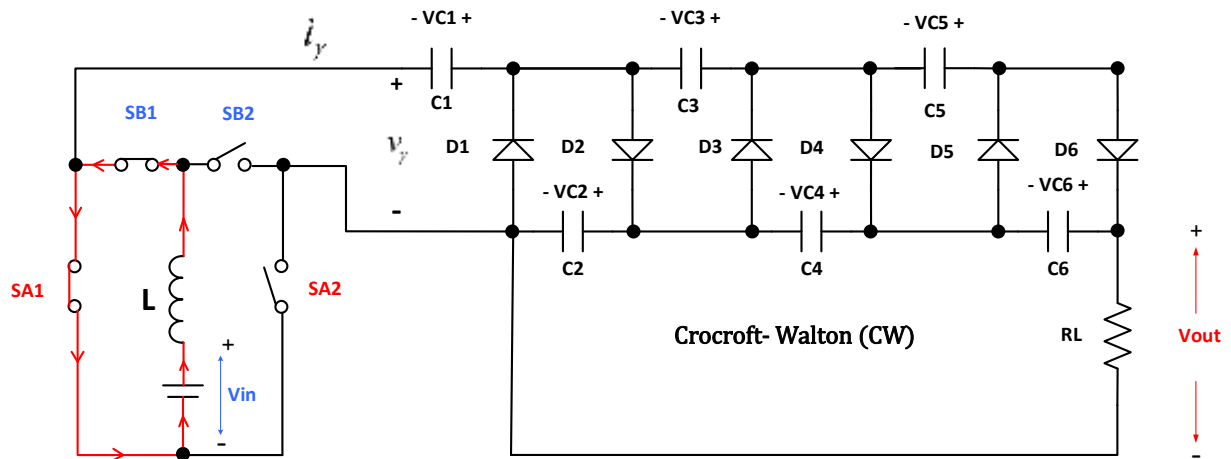
Pengganda Tegangan Cockcroft-Walton

Ada empat mode operasi pada rangkaian pengganda tegangan metode Cockcroft-Walton yaitu :

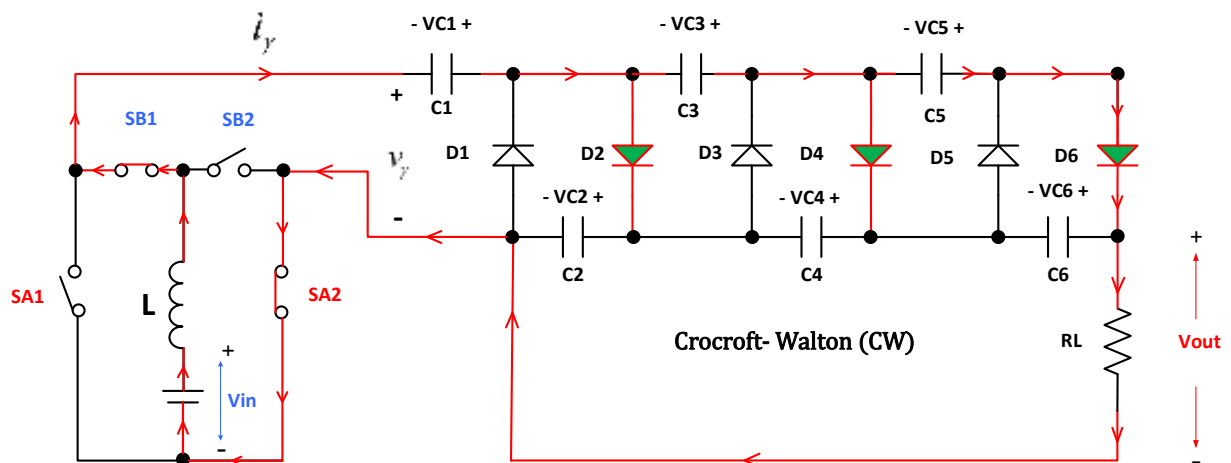
Mode 1

Kondisi 1: Pada periode 1, Saklar SA1 dan SB1 konduksi, arus sumber mengalir ke reaktor induktor penghalus, arus i_y sama dengan nol, kapasitor kelompok genap C2 dan C4 menyuplai muatan arus ke beban RL dan kapasitor kelompok ganjil kapasitor C1 dan C3 dalam kondisi mengambang (**Gambar 5a**).

Kondisi 2 : Pada waktu keadaan 2, Saklar SA2 dan SB1 konduksi , reaktor induktor penguat dan V_{in} mentransfer energi ke rangkaian pengali CW melalui kelompok dioda genap (**Gambar 5b**).



(a)



(b)

Gambar 5 . Arah aliran arus pada mode I. (a) Kondisi 1. (b) Kondisi 2.

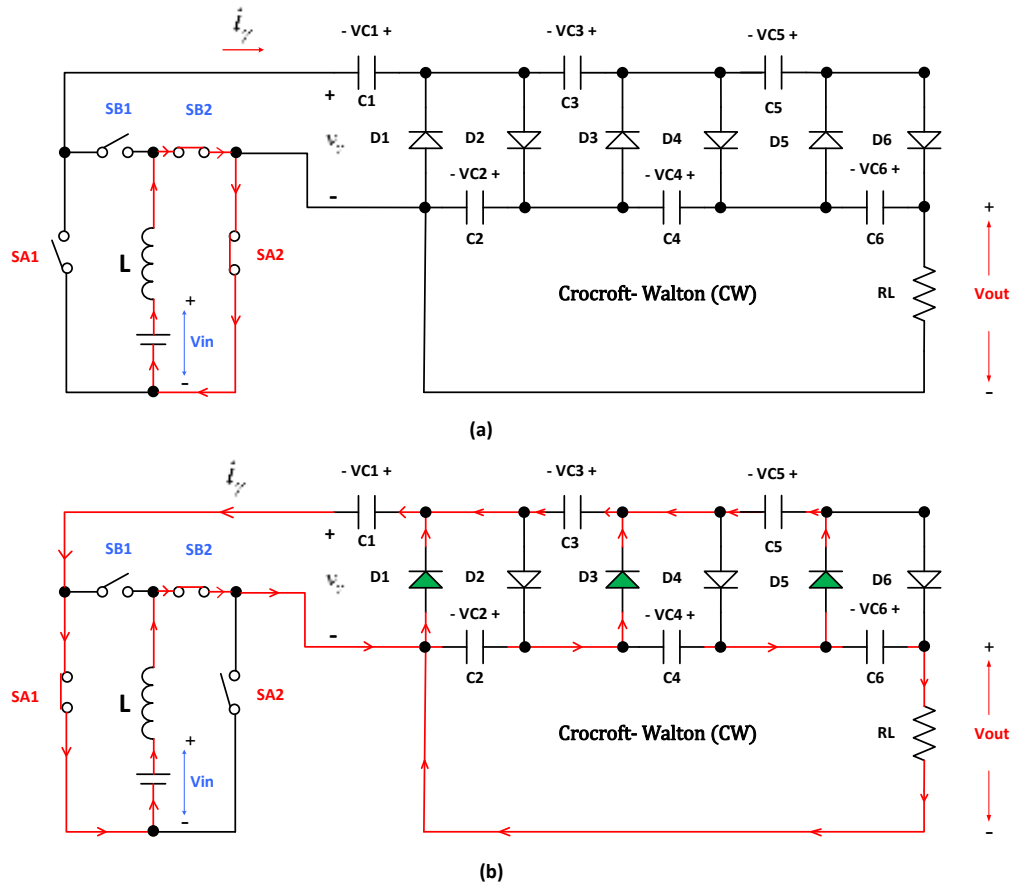
Mode 2

Pada kondisi 1, saklar SA2 dan SB2 dalam keadaan terhubung (ON) , V_{in} mencatu induktor, i_y bernilai nol karena jalur terputus oleh saklar SB1, kapasitor kelompok genap C2 dan C4 mensuplai beban RL, dan kapasitor kelompok ganjil C1 dan C3 mengambang (**Gambar 6a**).

Kondisi 2 : Selama periode 2, SA1 dan SB 2 konduksi (ON) , V_{in} mengalir arus ke reaktor induktor penguat dan mentransfer energi ke rangkaian penguat CW pada siklus negatif i_y mengalir melalui kelompok dioda ganjil (**Gambar 6b**).

Mode 3 dan Mode 4

Pada mode ini berlaku proses yang sama atau proses berulang seperti mode 1 dan mode 2



Gambar 6. (a) Aliran daya kondisi 1 . (b) aliran daya kondisi 2

Tabel 1 merupakan data teknis dari parameter yang dibangun

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Komponen dari Sistem

Parameter	Nilai
V_{in}	12 V
L	1.5 mH
$C1=C2=C3=C4=C5=C6$	470uF
RL	1 K
Saklar SA1,SA2,SB1, SB2	Transistor
F_c (Frekuensi Carrier)	60 kHz
F_m (Frekuensi Modulasi)	1 kHz
$D1=D2=D3=D4=D5=D6$	Dioda Tegangan Bias Maju 0,8 V dan $R_{on} = 0.001 \text{ ohm}$

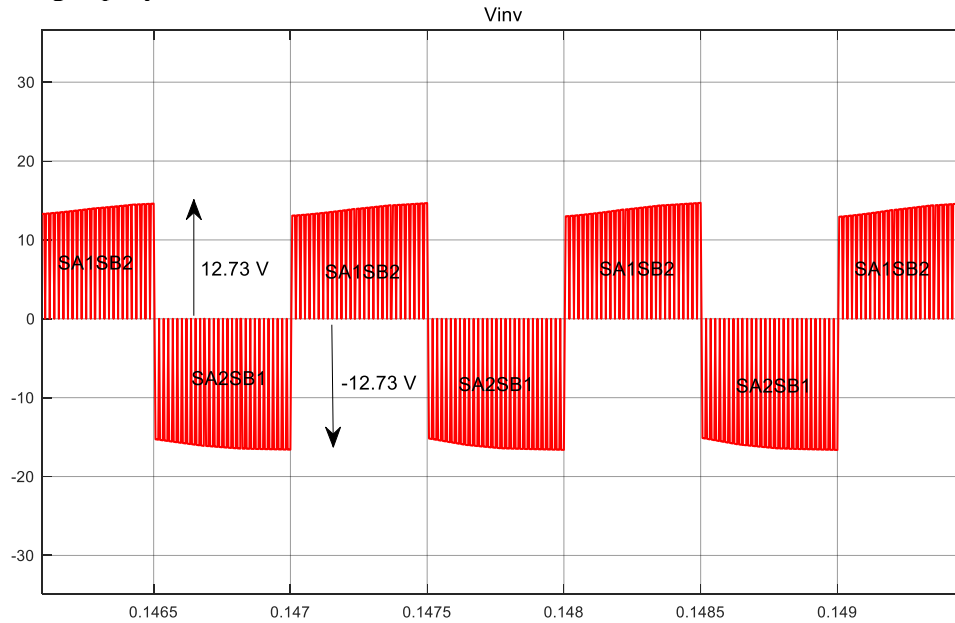
Tabel 2. Pengaruh variasi Pengaturan Duty Cycle terhadap tegangan keluaran

Duty Cycle	V_{out} (V)	I_{out} (A)
0.99	4314	5,005
0.9	439,7	0,4411
0.8	217,1	0,2174
0.7	147,2	0,1474
0.6	107,5	0,1076
0.5	86,11	0,08618
0.4	58,67	0,05871
0.3	45,43	0,04546
0.2	26,31	0,02632
0.1	8,196	0,008201

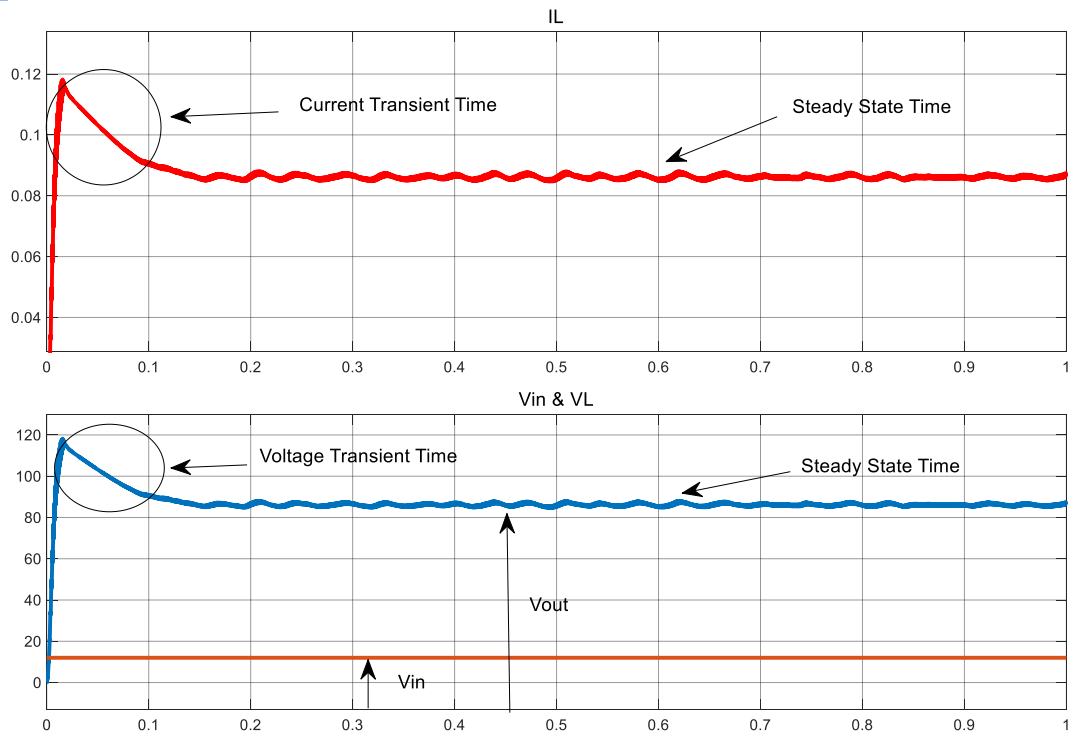
Tabel 2 merupakan hasil pengamatan tegangan keluaran CW berdasarkan perubahan pengaturan dutycycle pada penyalaan saklar SB1 dan SB2. Tampak bahwa semakin besar nilai dutycycle maka semakin besar pula tegangan keluaran.

Hasil Simulasi

Gambar 7 merupakan bentuk gelombang tegangan keluaran inverter yang membentuk pola persegi dengan pengaturan tegangan. Ketika siklus positif saklar yang beroperasi ON adalah saklar SA1 dan SB2, sedangkan pada siklus negatif saklar yang berada pada keadaan ON adalah SA2 dan SB1. Tinggi amplitudo gelombang sebesar 12.73 Vpp dutycycle 50% dengan frekuensi 60 kHz oleh penyalaan pulsa T1. Level amplitudo tersebut hampir sama dengan nilai tegangan masukannya 12 V, adanya deviasi sebesar 0,73 V dikarenakan adanya reaktor induktif yang dipasang seri dengan tegangan V_{in} . Daerah yang diarsir adalah bentuk pengaturan tegangan yang dikendalikan oleh pengaturan hidup mati saklar SB1 maupun SB2 oleh sinyal picu dengan penyalaan T2 1kHz.



Gambar 7. Gelombang pola kinerja tegangan keluaran inverter



Gambar 8. Bentuk gelombang arus keluaran , tegangan V_{in} dan V_{out} dari Pembangkit Tegangan DC Tinggi

Gambar 8 adalah arus beban, tegangan masukan V_{in} dan tegangan keluaran penguatan. Tampak bahwa pada awal inverter dihidupkan, ada proses transient baik untuk arus maupun tegangan hal ini dikarenakan adanya reaktor induktif penguatan yang dipasang seri dengan V_{in} . Besarnya tegangan transient dan durasi waktu transient untuk menuju ke kondisi steady state dapat ditentukan dengan persamaan :

Arus dalam waktu transient i_t

$$i_t = Ae^{-\frac{t}{R}}$$

Arus steady state i_{ss}

$$i_{ss} = \frac{V_{in}}{R}$$

Kemudian arus total dapat ditentukan persamaan:

$$i_t = i_t + i_{ss}$$

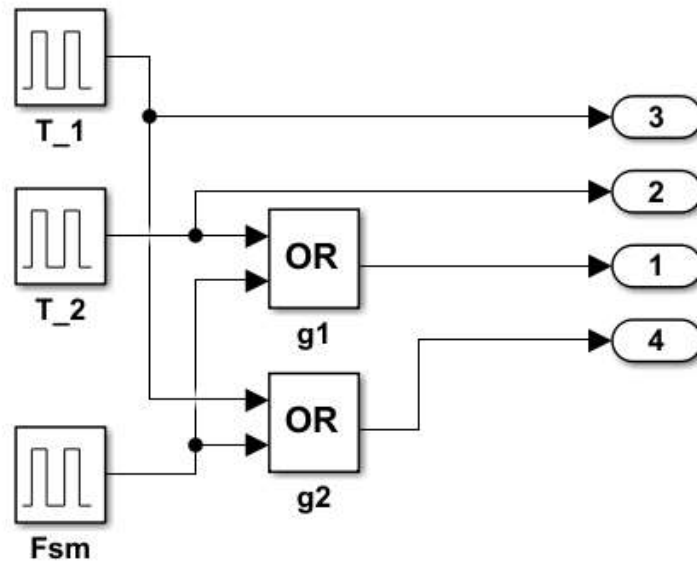
$$i_{total} = Ae^{-\frac{t}{R}} + \frac{V_{in}}{R}$$

Tegangan keluaran ini masih mengandung nilai ripple yang dipengaruhi oleh frekuensi gelombang tegangan masukan.

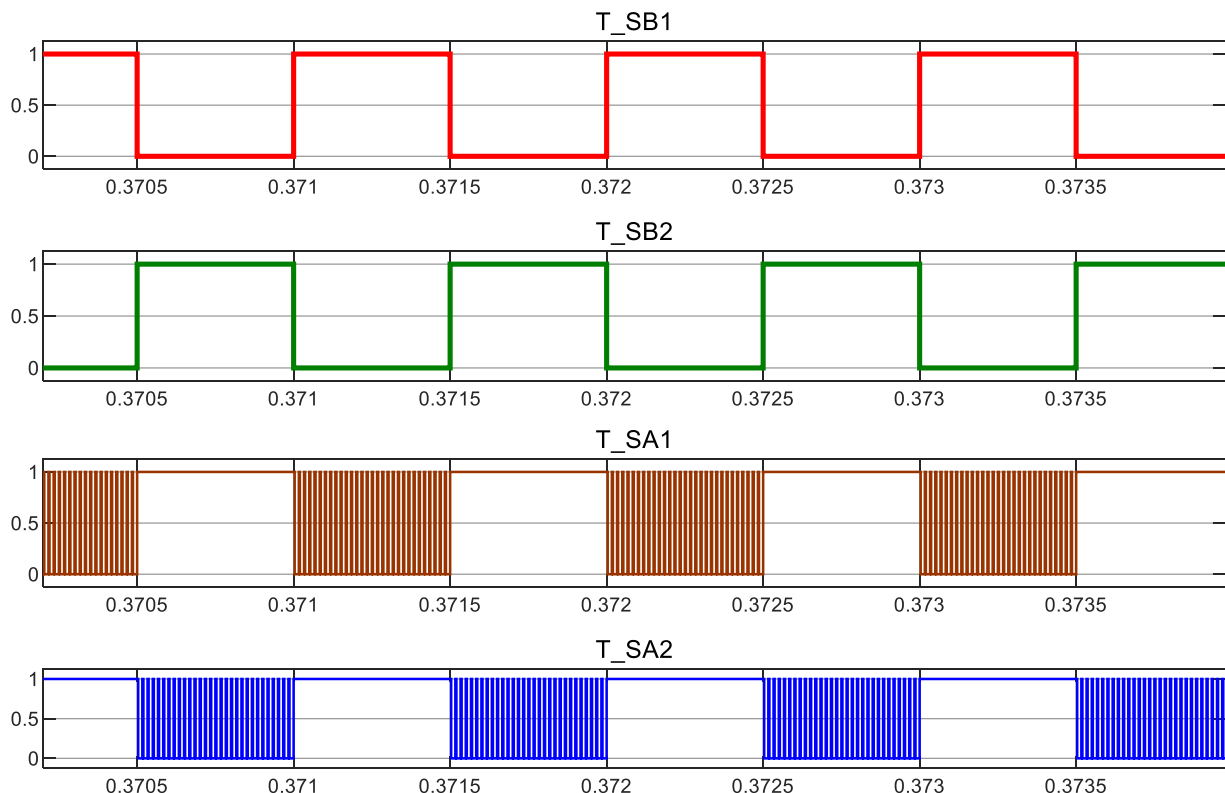
Disain Pembangkit Pulsa Penyalan Saklar SA1 , SA2 , SB1 dan SB2

Operasional saklar di aktifkan menggunakan pulsa penyalan dengan frekuensi yang berbeda. Saklar SB1 dan SB2 di operasikan dengan sinyal penyalan frekuensi 1 kHz. Saklar SA1 dan SA2 dipicu oleh deretan pulsa dengan frekuensi yang lebih tinggi dengan saklar SB1 dan SB2 sebesar 60 kHz yang bekerja pada periode ketika saklar tersebut pada mode ON. Adapun metodenya adalah dengan memodulasikan sinyal frekuensi 1 kHz ke gelombang picu dengan frekuensi 60 kHz . Tampak pada gambar xxxx T_1 dan T_2 merupakan gelombang pulsa 1 kHz yang berbeda fasa 180° . T_1 merupakan sinyal picu pada saklar SB1 bersama pulsa (fsm) frekuensi 60 kHz menjadi masukkan gerbang OR (g2) , output gerbang OR (g2) akan bernilai 1 ketika kedua masukan berada pada kondisi tinggi atau berbeda logika(0 dan 1) . Pulsa

keluaran ini digunakan untuk menyalakan Saklar SA1. Demikian pula T_2 sebagai sinyal penyalan saklar SB2 dengan frekuensi 1 kHz, untuk menghasilkan pulsa penyalan bagi saklar SA2, pulsa penyalan T_2 menjadi masukan gerbang OR (g1) bersama pulsa (fsm) . Keluaran gerbang OR (g1) akan berlogika 1 manakala kedua masukan berada pada keadaan 1 atau berbeda logika (0 atau 1).

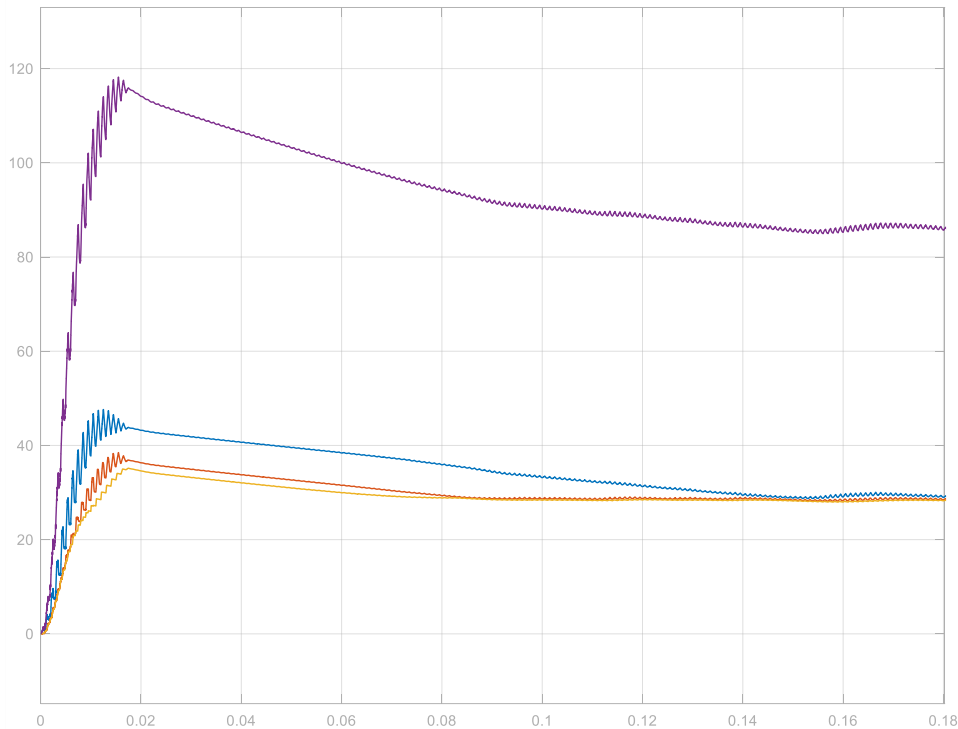


Gambar 9. Pemodelan Pembangkit Pulsa Penyalan



Gambar 10. Deretan pulsa penyalan saklar SA1 , SA2 , SB1 dan SB2

Gambar 10 menjelaskan deretan pulsa penyalaan saklar dimana tiap saklar dipicu oleh pulsa yang saling komplementer atau berbeda fasa 180° . Tujuannya adalah agar pasangan saklar tersebut dalam operasinya bekerja selalu berlawanan logika.



Gambar 11. Merupakan bentuk gelombang tegangan kapasitor C2,C4 dan C6 pada tiap Tahap

Gambar 11 menunjukkan level tegangan kapasitor pada tahap ke 1, 2 dan 3. Tampak bahwa kenaikan level tegangan tersebut hasil peningkatan dari kinerja rangkaian CW dimana inverter dipicu pada pulsa penyalaan dengan dutycyle 50%.

4. Kesimpulan

Rangkaian pembangkit tegangan DC tinggi dapat dibangun menggunakan metode CW yang mengubah tegangan bolak balik (AC) menjadi tegangan arus searah (DC) menggunakan untai penyearah. Sumber tegangan masukan juga dapat berupa tegangan DC namun terlebih dahulu diubah menjadi tegangan bolak balik melalui sebuah rangkaian inverter. Untuk memperbesar tegangan keluaran ini dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain dengan menambah sebuah reaktor induktor yang dipasang seri dengan tegangan masukan. Metode kedua adalah dengan meningkatkan jumlah tahap rangkaian pengali tegangan yang terdiri dari dua buah komponen dioda dan dua buah kapasitor yang dirangkai secara seri paralel. Cara ketiga adalah dengan pengaturan lebar pulsa (duty cycle) pulsa penyalaan inverter.

Setiap kenaikan tahap bernilai 2 kali dari tegangan puncak kapasitor dari tahap sebelumnya. Tegangan pada sisi beban terjadi penurunan hal ini akibat adanya drop tegangan pada tegangan dioda dan masih mengandung nilai ripple yang berasal dari penyearahan gelombang masukan. Ripple ini dapat diatasi dengan sebuah tapis yang dipasang pada sisi beban.

5. Referensi

- [1] Fukuyama, Takao, and Keiichi Sugihara. "Study on operating principle of Cockcroft-Walton circuit to produce plasmas using high-voltage discharge." *Plasma and Fusion Research* 11 (2016): 2401008-2401008.
- [2] Nandedkar, Vipul V., and Nigroth B. Narnaware. "Design and Implementation of a Cockcroft-Walton voltage Multiplier circuit." *International Journal of Engineering Development and Research* 5.2 (2017): 261-264.
- [3] Wijono, Wijono, et al. "Plasma generator: design of six stage cockcroft-walton voltage multiplier 12 kV for impulse voltage generation." *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 17.4 (2019): 1890-1897

- [4] Minami, Masataka, Takumi Yasuda, and Jun-ichi Itoh. "Theoretical analysis and improvement of output voltage for resonant Cockcroft-Walton circuit." *IEEJ Journal of Industry Applications* 10.2 (2021): 221-226.
- [5] Priya, Shashank, et al. "Comparison of n-stage cascade cockcroft-walton voltage multiplier applied to transformer-less dc-dc boost converter." *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications* 1.1 (2015): 349-354.
- [6] Ruzbehani, Mohsen. "A Comparative Study of Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multipliers." *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2017.1 (2017): 4805268.
- [7] D. H. Al-mamoori, O. M. Neda, and Z. H. Al-tameemi, "Generating High Voltage DC with Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Testing Locally Assemble Electric Field Sensor Generating High Voltage DC with Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Testing Locally Assemble Electric Field Sensor," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/518/4/042019.
- [8] A. Jaiwanglok, K. Eguchi, K. Smerpitak, and A. Julsereewong, "Modification of Cockcroft – Walton-Based High-Voltage Multipliers with 220 V and 50 Hz Input for Non-Thermal Food Processing Apparatus," 2020.
- [9] S. Iqbal and R. Besar, "A Bipolar Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Gas Lasers A Bipolar Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Gas Lasers," no. October 2007, 2014, doi: 10.3844/ajassp.2007.795.801.
- [10] Mudeng, Vicky, et al. "Design of Five Stages Cockcroft-Walton with Passive Filter." *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. IEEE, 2019.
- [11] A. R. Thakare, S. B. Urkude, and R. P. Argelwar, "Analysis of Cockcroft - Walton Voltage Multiplier," vol. 5, no. 3, pp. 3–5, 2015.
- [12] A. Jain and E. Simith, "AC-DC Matrix Converter Based On Cockcroft-Walton Voltage Multiplier," vol. 04, no. 07, pp. 16–23, 2014.
- [13] A. K. Sinha and R. Kumar, "Generation Of High Voltage Using Cockcroft – Walton Voltage Multiplier Circuit," pp. 510–513, 2018.
- [14] Ruzbehani, Mohsen. "A Comparative Study of Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multipliers." *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2017.1 (2017): 4805268.
- [15] Parameswara Reddy, D., V. Suvitha, and K. Somasekhar. "DC-DC Converter Based on Cockcroft-Walton for High Voltage Gain." *Power Electronics and Renewable Energy Systems: Proceedings of ICPERES 2014*. Springer India, 2015.