

BAB V

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Bab V Tugas Akhir ini menyajikan hasil pengujian serta analisis terhadap sistem pembangkit tegangan tinggi yang dirancang dengan variasi lilitan primer. Pengujian dan analisis difokuskan pada pengukuran tegangan masukan dan tegangan keluaran pada modul ZVS serta transformator flyback sebagai komponen utama yang berfungsi menghasilkan tegangan tinggi.

5.1 Persiapan Pengukuran dan Pengujian Sistem Pembangkit Tegangan Tinggi

Persiapan pengukuran dan pengujian sistem pembangkit tegangan tinggi meliputi penyiapan peralatan ukur, alat pelindung diri (APD), serta prosedur pelaksanaan pengujian. Adapun persiapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

5.1.1 Peralatan Pengukuran dan Pengujian Sistem

Pengukuran dan pengujian sistem pembangkit tegangan tinggi memerlukan beberapa peralatan untuk mengukur besaran tegangan dan mengamati bentuk gelombang. Adapun peralatan yang digunakan meliputi:

1. Multimeter digital
2. Probe tegangan tinggi (1:1000)
3. Osiloskop

5.1.2 Prosedur Pengumpulan Data

Pada perancangan Tugas Akhir ini diperlukan suatu prosedur pengumpulan data untuk memperoleh hasil pengujian yang sistematis. Prosedur pengumpulan data tersebut meliputi pengukuran tegangan dan pengamatan bentuk gelombang guna mengevaluasi kinerja alat yang telah dikembangkan sebagai berikut:

1. Pengukuran Dengan Multimeter

Pengukuran menggunakan multimeter dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan masukan pada transformator flyback.

2. Pengukuran Dengan Probe Tegangan Tinggi dan Multimeter

Pengukuran tegangan keluaran transformator flyback dilakukan menggunakan probe tegangan tinggi yang dipadukan dengan multimeter. Probe tegangan

tinggi yang digunakan memiliki rasio atenuasi 1:1000 dengan kemampuan pengukuran hingga 40 kV.

5.1.3 Prosedur dan Pengujian Sistem

Prosedur pengukuran dan pengujian sistem pembangkit tegangan tinggi dilakukan untuk mengetahui karakteristik tegangan pada setiap bagian sistem serta mengevaluasi kinerja alat. Adapun langkah-langkah pengujian adalah sebagai berikut:

1. Memeriksa kondisi sistem pembangkit tegangan tinggi dan memastikan seluruh koneksi kabel terpasang dengan baik.
2. Mengukur tegangan masukan dan bentuk gelombang pada modul *Zero Voltage Switching* (ZVS) di terminal VCC dan GND dengan variasi *duty cycle* dan frekuensi.
3. Mengukur tegangan keluaran dan bentuk gelombang pada modul ZVS di terminal GND ZVS –P1 dan GND–P2.
4. Mengukur tegangan keluaran pada transformator flyback.
5. Mencatat serta mendokumentasikan seluruh hasil pengukuran dan pengujian.
6. Menganalisis data hasil pengukuran dan pengujian yang telah diperoleh.

5.2 Pengukuran dan Pengujian Sistem Pembangkit Tegangan Tinggi

Pengukuran dan pengujian pada sistem pembangkit tegangan tinggi dilakukan dengan mengukur tegangan masukan dan keluaran serta mengamati bentuk gelombang pada driver ZVS. Selain itu, dilakukan pula pengukuran tegangan keluaran pada transformator *flyback*. Pengujian dilaksanakan dalam tiga tahap dengan parameter tegangan masukan tetap sebesar 24 V dan frekuensi tetap 3 kHz. Pada setiap tahap, dilakukan empat kali percobaan dengan variasi *duty cycle* sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100%. Variasi parameter tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh *duty cycle* terhadap karakteristik keluaran serta memperoleh hasil tegangan tinggi yang dihasilkan oleh sistem. Hasil pengukuran, pengujian, dan analisisnya disajikan sebagai berikut.

5.2.1 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Masukan SMPS

Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan tegangan masukan AC yang diterima oleh SMPS berada dalam rentang normal sesuai standar tegangan jaringan

listrik PLN, sebelum dikonversi menjadi tegangan 24 VDC yang digunakan untuk mencatu modul lainnya pada sistem. Hasil pengukuran tegangan masukan disajikan pada Tabel 5.1

Tabel 5. 1 Hasil Pengukuran Tegangan Masukan SMPS

Percobaan	Tegangan masukan	Tampilan hasil ukur
1	219.6V	

Berdasarkan nilai pengukuran, tegangan masukan SMPS terukur sebesar 219,6 VAC. Nilai berada dalam rentang toleransi standar tegangan jaringan Listrik PLN sebesar 220V $\pm 10\%$, sehingga dapat disimpulkan sumber tegangan AC dalam kondisi normal dan layak digunakan.

5.2.2 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Keluaran SMPS

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan tegangan keluaran DC dari SMPS sesuai dengan spesifikasi (24V), karena tegangan ini menjadi catu daya utama bagi modul-modul pada sistem. Hasil pengukuran tegangan masukan disajikan pada Tabel 5.2

Tabel 5. 2 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran SMPS

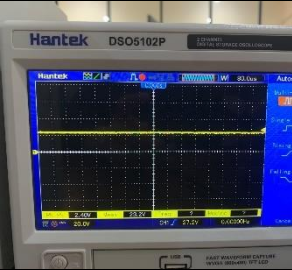
Percobaan	Tegangan keluaran	Tampilan hasil ukur
1	24.11V	

Hasil pengukuran menunjukkan tegangan keluaran sebesar 24,11 VDC, sangat mendekati nilai nominal spesifikasi SMPS yaitu 24V. masih berada dalam batas toleransi tegangan yang wajar dengan umumnya memiliki toleransi $\pm 3-5\%$.

5.2.3 Hasil dan Analisis Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran SMPS

Setelah dilakukan pengukuran tegangan keluaran SMPS, selanjutnya dilakukan pengujian bentuk gelombang keluaran menggunakan osiloskop. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik bentuk gelombang tegangan keluaran SMPS serta memastikan bahwa tegangan yang dihasilkan berupa tegangan DC. Hasil pengujian bentuk gelombang keluaran disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran SMPS

Percobaan	Tegangan keluaran	Bentuk Gelombang
1	24.11V	

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran SMPS sebesar 24,11 VDC. Berdasarkan tampilan osiloskop, bentuk gelombang keluaran terlihat relatif datar dan stabil pada level tegangan DC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa SMPS mampu menghasilkan tegangan keluaran DC yang selanjutnya digunakan sebagai sumber catu daya untuk rangkaian pada tahap berikutnya.

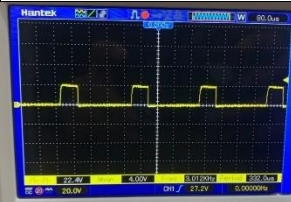
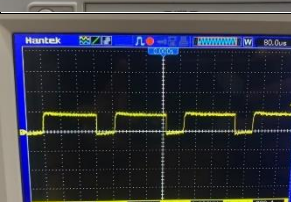
5.2.4 Hasil dan Analisis Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran PWM

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk gelombang keluaran PWM Generator pada variasi duty cycle sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pengujian dilakukan menggunakan osiloskop untuk mengamati perubahan lebar pulsa pada setiap variasi duty cycle. Nilai duty cycle ditentukan berdasarkan perbandingan antara waktu sinyal berada pada kondisi ON terhadap periode satu siklus. Persamaan yang digunakan ditunjukkan pada persamaan:

$$D = \frac{T_{ON}}{T} 100\%$$

Berdasarkan persamaan tersebut, variasi duty cycle yang digunakan dalam pengujian terdiri dari 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pada duty cycle 25%, sinyal berada pada kondisi ON selama seperempat periode. Pada 50%, sinyal berada pada kondisi ON selama setengah periode. Pada 75%, sinyal berada pada kondisi ON selama tiga perempat periode, sedangkan pada 100%, sinyal berada pada kondisi ON selama satu periode penuh. Hasil pengujian bentuk gelombang keluaran PWM Generator disajikan pada Tabel 5.4.

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran PWM

Percobaan	Duty Cycle	Bentuk Gelombang
1	25%	
2	50%	
3	75%	
4	100%	

Berdasarkan hasil pengujian, bentuk gelombang keluaran PWM Generator menunjukkan perubahan lebar pulsa sesuai dengan variasi duty cycle. Pada duty cycle 25%, pulsa memiliki lebar yang lebih kecil. Lebar pulsa meningkat pada duty cycle 50% dan 75%. Sementara itu, pada duty cycle 100%, sinyal berada pada

kondisi tinggi secara terus-menerus sehingga tidak terlihat bentuk pulsa seperti pada variasi duty cycle lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa PWM Generator mampu menghasilkan sinyal keluaran dengan variasi duty cycle sesuai dengan nilai yang ditentukan.

5.2.5 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Masukan ZVS

Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi *duty cycle* sinyal PWM (25%, 50%, 75%, 100%) terhadap masukan rangkaian ZVS dalam kondisi tanpa beban trafo *flyback*, sehingga menghasilkan nilai tegangan keluaran yang berbeda-beda. Hasil pengukuran tegangan masukan untuk setiap variasi parameter PWM disajikan pada Tabel 5.5

Tabel 5. 5 Hasil Pengukuran Tegangan Masukan ZVS

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	Tegangan masukan	Tampilan hasil ukur
1	25%	6,39 V	
2	50%	12.41 V	
3	75%	18.40 V	
4	100%	24.10 V	

Pada tabel hasil pengukuran tegangan masukan pada modul ZVS dilakukan dengan tegangan masukan 24 V, frekuensi 3 kHz, dan variasi *duty cycle*. Nilai tegangan keluaran teoritis dihitung menggunakan Persamaan sebagai berikut:

- Percobaan 1, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 25\% \times 24V = 6V$
- Percobaan 2, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 50\% \times 24V = 12V$
- Percobaan 3, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 75\% \times 24V = 18V$
- Percobaan 4, $V_{out} = Duty\ cycle \times V_{in} = 100\% \times 24V = 24V$

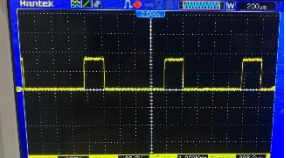
Berdasarkan hasil pengukuran diatas maka dapat di analisa bahwa:

Hasil pengujian ini membuktikan tegangan masukan ZVS berbanding lurus dengan *duty cycle* PWM, mengkonfirmasi bahwa modul dual mosfet berfungsi dengan baik sebagai pengatur daya rata-rata yang masuk ke rangkaian ZVS melalui mekanisme switching-gating, bukan sebagai regulator tegangan tetap.

5.2.6 Hasil dan Analisis Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran ZVS

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik bentuk gelombang keluaran rangkaian ZVS pada variasi *duty cycle* sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pengujian dilakukan menggunakan osiloskop untuk mengamati bentuk gelombang keluaran pada setiap variasi *duty cycle*. Hasil pengujian bentuk gelombang keluaran rangkaian ZVS disajikan pada Tabel 5.6.

Tabel 5. 6 Hasil Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran ZVS

Percobaan	Duty Cycle	Bentuk Gelombang
1	25%	
2	50%	
3	75%	
4	100%	

Berdasarkan hasil pengujian bentuk gelombang pada keluaran modul ZVS, diperoleh bentuk gelombang yang mengalami perubahan pada setiap variasi *duty cycle*. Pada *duty cycle* 25%, 50%, dan 75% terlihat adanya bentuk gelombang berosilasi yang menunjukkan proses *switching* pada rangkaian ZVS. Perubahan *duty cycle* PWM memengaruhi karakteristik dan amplitudo gelombang keluaran ZVS. Pada *duty cycle* 100%, bentuk gelombang yang dihasilkan tidak lagi menunjukkan pulsa yang jelas seperti pada variasi sebelumnya, melainkan berupa sinyal dengan amplitudo yang relatif kecil dan disertai osilasi. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan *duty cycle* PWM memengaruhi kondisi kerja rangkaian ZVS dan bentuk gelombang yang dihasilkan.

5.2.7 Hasil dan Analisis Pengukuran Tegangan Keluaran Transformator *Flyback*

Transformator *flyback* yang digunakan pada penelitian ini memiliki karakteristik tidak ideal karena jumlah lilitan pada sisi sekundernya tidak diketahui. Oleh sebab itu, tegangan keluaran pada sisi sekunder tidak dapat dihitung secara teoritis. Untuk memperoleh karakteristik keluarannya, dilakukan pengujian dengan memberikan variasi lilitan pada sisi primer serta variasi tegangan masukan yang telah dimodulasi menggunakan sinyal PWM.

Pengukuran tegangan keluaran dilakukan menggunakan probe *high-voltage* (1:1000), dengan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 5.7–5.8.

Tabel 5. 7 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Transformator *Flyback* dengan Variasi 10 Lilitan Primer

Percobaan	<i>Duty cycle</i>	<i>Vout Flyback</i>	Tampilan hasil ukur
1	25%	15,245 V	
2	50%	14,939 V	
3	75%	12,834 V	
4	100%	10,175 V	

Tegangan keluaran transformator *flyback* pada variasi 10 lilitan primer berbanding terbalik dengan duty cycle sinyal PWM. duty cycle rendah (25%) menghasilkan tegangan keluaran tertinggi, yaitu sebesar 15,245 kV, karena efek termal yang lebih kecil serta adanya *overshoot* resonan pada setiap awal *burst*. Sebaliknya, duty cycle tinggi (100%) menghasilkan tegangan keluaran terendah, yaitu sebesar 10,175 kV, akibat akumulasi panas pada inti ferit yang menurunkan efisiensi kopling magnetik serta berkurangnya efek *overshoot* karena sistem beroperasi secara kontinu tanpa jeda. Hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa penggunaan duty cycle rendah lebih optimal untuk menghasilkan tegangan keluaran tinggi pada sistem pembangkit tegangan tinggi DC.

Tabel 5. 8 Hasil Pengukuran Tegangan Keluaran Transformator Flyback dengan Variasi 15 Lilitan Primer

Percobaan	Duty cycle	Vout Flyback	Tampilan hasil ukur
1	25%	8,188 V	
2	50%	8,231 V	
3	75%	7,087 V	
4	100%	4,5496 V	

Tegangan keluaran transformator *flyback* pada variasi 15 lilitan primer menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dibandingkan variasi 10 lilitan primer pada seluruh variasi *duty cycle*. Tegangan keluaran tertinggi yang diperoleh

sebesar 8,231 kV pada *duty cycle* 50%, sedangkan tegangan terendah sebesar 4,596 kV pada *duty cycle* 100%. Pola penurunan tegangan seiring dengan meningkatnya *duty cycle* juga konsisten dengan hasil pengukuran pada variasi 10 lilitan primer, sehingga menunjukkan bahwa *duty cycle* rendah hingga menengah merupakan kondisi yang optimal untuk menghasilkan tegangan keluaran tinggi pada sistem ini. Selain itu, hasil pengujian membuktikan bahwa penambahan jumlah lilitan primer berbanding terbalik dengan tegangan keluaran transformator *flyback*, karena peningkatan impedansi pada sisi primer menyebabkan berkurangnya efisiensi transfer energi resonan ke sisi sekunder.