

# Prototipe *Power Supply Gate Driver* untuk *Multilevel Inverter* dengan Menggunakan *Flyback Converter Multi Output*

Novie Ayub Windarko<sup>1</sup>, Akhmad Puryanto<sup>2</sup>, Rachma Prilian Eviningsih<sup>3</sup>, Moh. Zaenal Efendi<sup>4</sup>, Eka Prasetyono<sup>5</sup>, Bambang Sumantri<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Departemen Teknik Elektro,

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

<sup>1</sup>ayub@pens.ac.id, <sup>2</sup>akhmad.puryanto97@gmail.com, <sup>3</sup>rachmaevin@pens.ac.id, <sup>4</sup>zen@pens.ac.id, <sup>5</sup>eka@pens.ac.id, <sup>6</sup>bambang@pens.ac.id

## Abstrak

Dengan perkembangan konverter elektronika daya, kebutuhan untuk memperkecil ukuran dan keandalan semakin meningkat. Dengan meningkatnya frekuensi *switching* pada konverter, maka  $dv/dt$  yang tinggi dapat menyebabkan kesalahan dalam *turn-on* ataupun *turn-off switching devices*. Masalah-masalah tersebut dapat diatasi dengan menerapkan tegangan bias negatif untuk melakukan *turn-off switching devices*. Makalah ini mengusulkan prototipe *power supply gate driver* yang dikhususkan untuk *Multi Level Inverter* (MLI). Sebuah prototipe *power supply gate driver* yang menggunakan satu unit konverter *flyback* dengan multi output untuk tegangan bias positif dan negatif, serta terisolasi galvanis sebanyak *switching devices* MLI. Dengan menggunakan topologi dasar *flyback* maka konverter ini memiliki isolasi galvanis melalui trafo frekuensi tinggi. Dari hasil eksperimen proses *switching* bisa berubah dari kondisi dari on menuju off dan dari off menuju on bisa berjalan secara sempurna.

**Kata kunci:** *power supply, gate driver, MLI, flyback, multioutput.*

## Abstract

As the power electronic converters develop rapidly, the need of compactness and reliability increases accordingly. Higher switching frequency may leads to faulty when turning on and off the switching devices. These problems can be solved by applying negative bias voltage when turning off switching devices. This study proposes *gate driver power supply* prototype specially designed for *Multi Level Inverter* (MLI). This prototype used a *flyback* converter with multioutput for positive and negative bias voltage, and also isolated by galvanic as many as the MLI switching devices. By using *flyback* topology, the converter has galvanic isolation through high frequency transformer. The experiments show that the switching process from-on-to-off and from-off-to-on works perfectly.

**Keywords:** *power supply, gate driver, MLI, flyback, multioutput.*

## 1. Pendahuluan

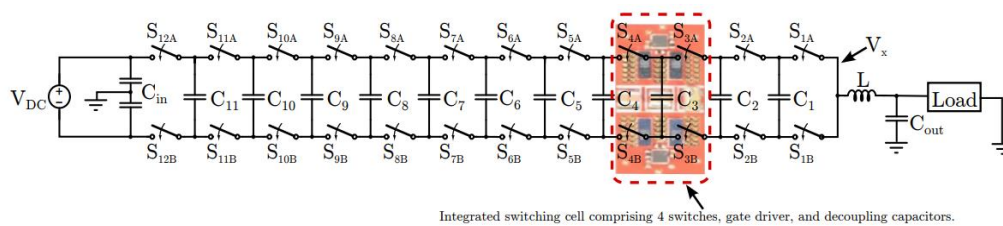
Dalam beberapa dekade ini, konverter daya dc ke ac, atau biasa disebut *inverter*, memainkan peran penting dalam *variable frequency drives, air conditioning, uninterruptible power supplies, induction heating, high-voltage dc power transmission*, penggerak kendaraan listrik, filter aktif, dan pemanfaatan sumber daya energi terbarukan [1]. Berdasarkan sifat

bentuk gelombang output, *inverter* dapat diklasifikasikan sebagai: *square wave inverters*, *quasi-square wave inverters*, *two-level pulse width modulation (PWM) inverters*, and *multilevel inverters (MLI)* [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, *multilevel inverter* telah menjadi semakin menarik karena sesuai untuk aplikasi tegangan tinggi, efisiensi tinggi dan EMI yang rendah, sesuai untuk aplikasi daya besar, tegangan output distorsi rendah dan respon dinamik yang baik[3]. Efisiensi tinggi dan EMI yang rendah dapat dihasilkan karena *switching devices turn-on* dan *turn-off* hanya satu kali per siklus. MLI didesain untuk menghasilkan daya yang besar meskipun dengan menggunakan *switching devices* semikonduktor dengan rating tegangan rendah.

Prinsip kerja MLI adalah melakukan konversi daya dengan menghasilkan tegangan tangga yang menyerupai gelombang sinus. MLI menggunakan beberapa sumber tegangan DC yang dijumlahkan untuk menghasilkan tegangan AC. Kapasitor, baterai, dan sumber tegangan energi terbarukan dapat digunakan sebagai sumber tegangan DC pada MLI. Semakin banyak sumber tegangan DC, maka tegangan output mendekati mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Oleh sebab itu rugi daya *switching* menjadi rendah dan komponen penyaklaran tidak mengalami stress tegangan yang tinggi [4]. Namun, *Multilevel inverter* memiliki beberapa kelemahan. Salah satu kelemahan khusus adalah banyaknya kekuatan *switching* semikonduktor diperlukan. Meski tingkat komponen *switching devices* bertegangan rendah dapat digunakan dalam *Multilevel inverter*, namun masing-masing *switching devices* membutuhkan *gate driver*. Hal ini dapat menyebabkan keseluruhan sistem menjadi lebih mahal dan kompleks. Untuk implementasi praktis, sangat penting untuk mengurangi jumlah *switching devices* dan *gate driver*. Lebih jauh telah diteliti beberapa aplikasi MLI baru dengan pengoperasian yang efisien, ukuran yang lebih kecil, *gate driver* lebih sedikit serta biaya rendah[5]-[6].

Beberapa peneliti tertarik untuk mengembangkan *power supply* untuk *gate driver* pada *inverter*. Khususnya untuk MLI, sebagian besar *switching devices* pada posisi mengambang, sehingga jumlah *power supply* yang dibutuhkan cukup banyak. Hal ini menimbulkan kerumitan tersendiri pada rangkaian.



Gambar 1. *Inverter* 13 level dengan *power supply gate driver* per 4 *switching devices*

Beberapa peneliti menggunakan prinsip Bootstrap charge pump untuk *power supply gate driver* pada MLI [7]. *Power supply* bertegangan rendah bisa dari kapasitor dc link. Namun topologi ini dapat menyebabkan permasalahan EMI dan asimetri dari sisi pandang topologi maupun pengoperasian [8]. Sebagian peneliti menggunakan DC-DC Converter On-chip [9]-[10] sebagai solusi yang efektif, ditunjukkan pada Gambar 1. Namun penggunaan On-Chip menyebabkan biaya yang mahal [11].

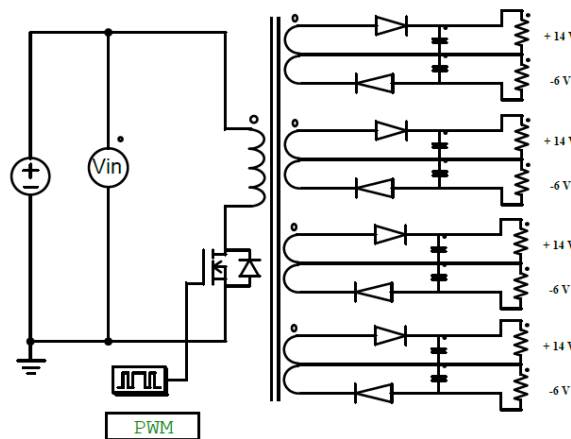
Dengan perkembangan konverter elektronika daya, kebutuhan untuk memperkecil ukuran dan keandalan semakin meningkat. Pada konverter yang menggunakan induktor atau transformator, dimensi komponen magnetik biasanya berbanding terbalik dengan

frekuensi *switching*. Dengan meningkatnya frekuensi *switching*, maka  $dv/dt$  yang tinggi dapat menyebabkan kesalahan dalam *turn-on* ataupun *turn-off switching devices*. Masalah-masalah tersebut dapat diatasi dengan menerapkan bias negatif untuk melakukan *turn-off switching devices* [12].

Pada makalah ini dipaparkan tentang prototipe *power supply gate driver* yang dikhususkan untuk MLI. Prototype menggunakan satu unit konverter flyback dengan multi output untuk bias tegangan positif dan negatif, serta terisolasi galvanis sebanyak *switching devices* MLI. Prototype ini diharapkan bisa berbentuk rangkaian sederhana, namun tetap bisa berfungsi dengan baik.

## 2. Metode

### 2.1. Rangkaian Flyback Converter Multi Output



Gambar 2. Flyback multioutput dengan tegangan bias positif dan negatif

Gambar 2 menunjukkan konverter yang diusulkan untuk memenuhi kebutuhan *power supply gate driver*. Sesuai dengan kebutuhan pada MLI, konverter tersebut menyediakan multioutput dan menyediakan tegangan bias positif dan negatif. Konverter yang digunakan adalah tipe flyback. Dengan menggunakan topologi dasar flyback maka konverter ini memiliki isolasi galvanis melalui trafo frekuensi tinggi.

### 2.2 Prinsip Kerja Flyback Converter Multi Output

Flyback terdiri dari trafo isolasi frekuensi tinggi antara input dan output, satu *switching devices* di sisi primer, diode penyearah pada sisi sekunder dan filter C pada sisi sekunder dan tersier, seperti ditunjukkan Gambar 3. Prinsip kerja Flyback adalah memanfaatkan induktansi magnetic dari trafo sebagai penyimpan energi pada saat konversi daya. Prinsip kerja dianalisis berdasarkan *switching devices* tertutup dan terbuka.

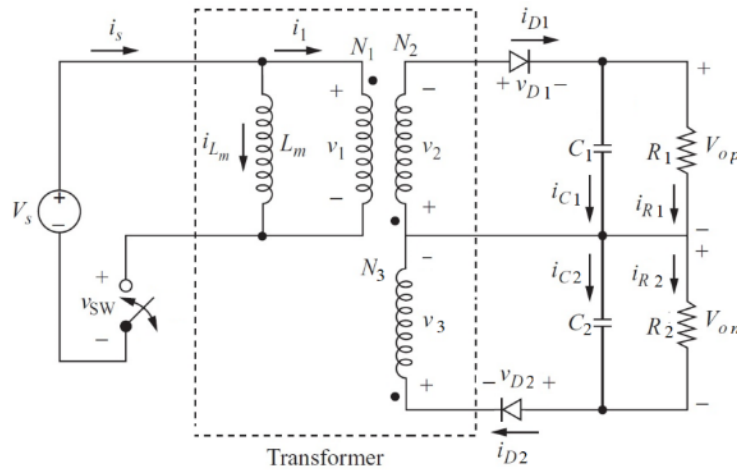
Saat *switching devices* tertutup, sumber tegangan  $V_s$  akan paralel dengan tegangan kumparan primer  $V_1$ . Pada sisi primer trafo arus akan mengalir ke  $L_m$  dan kumparan  $N_1$ . Sehingga:

$$v_1 = V_s = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (1)$$

Bila dinyatakan dalam perubahan arus pada  $L_m$  maka:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_s}{L_m} \quad (2)$$

di mana  $DT$  adalah periode atau durasi waktu selama *switching devices* tertutup.



Gambar 3. Analisa rangkaian flyback multioutput

Arus yang mengalir ke  $L_m$  akan disimpan sebagai energi. Maka perubahan arus selama *switching devices* tertutup sebesar:

$$(\Delta i_{Lm})_{closed} = \frac{V_s DT}{L_m} \quad (3)$$

Pada sisi sekunder dan tersier arus tidak dapat mengalir karena arah arus bias mundur terhadap diode  $D_1$  dan  $D_2$ . Pada kondisi ini beban  $R_1$  dan  $R_2$  disuplai arus dari  $C_1$  dan  $C_2$ . Di mana:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right) = V_s \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (4)$$

$$v_3 = v_1 \left( \frac{N_3}{N_1} \right) = V_s \left( \frac{N_3}{N_1} \right) \quad (5)$$

$$V_{d1} = -V_{op} - V_s \left( \frac{N_2}{N_1} \right) < 0 \quad (6)$$

$$V_{d2} = -V_{on} - V_s \left( \frac{N_3}{N_1} \right) < 0 \quad (7)$$

$$i_1 = i_2 = i_3 = 0 \quad (8)$$

Di mana  $V_{d1}$  dan  $V_{d2}$  adalah tegangan pada diode  $D_1$  dan  $D_2$ .  $V_{op}$  adalah tegangan bias positif, dan  $V_{on}$  adalah tegangan bias negatif.

Saat *switching devices* terbuka, pada sisi primer trafo, arus akan mengalir dari  $L_m$  ke kumparan  $N_1$ . Arus yang mengalir di kumparan  $N_1$  akan transfer ke kumparan sekunder  $N_2$  dan kumparan tersier  $N_3$ . Diode  $D_1$  dan  $D_2$  mendapatkan arus bias maju, sehingga arus

mengalir ke  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$  dan  $R_2$ . Dengan mengasumsikan tegangan output  $V_{op}$  dan  $V_{on}$  tetap konstan, maka tegangan kumparan sekunder  $N_2$  dan kumparan tersier  $N_3$  menjadi sama dengan  $V_{op}$  dan  $V_{on}$

$$v_2 = -V_{op} \quad (9)$$

$$v_3 = -V_{on} \quad (10)$$

Tegangan ini akan berimbas ke tegangan kumparan primer yang paralel terhadap  $L_m$ , sehingga:

$$v_1 = -V_{op} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (11)$$

atau

$$v_1 = -V_{on} \left( \frac{N_1}{N_3} \right) \quad (12)$$

$$L_m \frac{di_{Lm}}{dt} = v_1 = -V_{op} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (13)$$

$$L_m \frac{di_{Lm}}{dt} = v_1 = -V_{on} \left( \frac{N_1}{N_3} \right) \quad (14)$$

Bila dinyatakan dalam perubahan arus pada  $L_m$  maka:

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = -\frac{V_{op}}{L_m} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (15)$$

atau

$$\frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = -\frac{V_{on}}{L_m} \left( \frac{N_1}{N_3} \right) \quad (16)$$

Di mana  $(1-D)T$  adalah periode/durasi waktu selama *switching devices* terbuka.

Arus  $L_m$  yang mengalir merupakan pelepasan energi. Maka perubahan arus  $L_m$  selama *switching devices* terbuka sebesar:

$$(\Delta i_{Lm})_{open} = \frac{-V_{op}(1-D)T}{L_m} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (17)$$

atau

$$(\Delta i_{Lm})_{open} = \frac{-V_{on}(1-D)T}{L_m} \left( \frac{N_1}{N_3} \right) \quad (18)$$

Dalam satu periode total arus yang mengalir pada  $L_m$  adalah nol.

$$(\Delta i_{Lm})_{open} + (\Delta i_{Lm})_{closed} = 0 \quad (19)$$

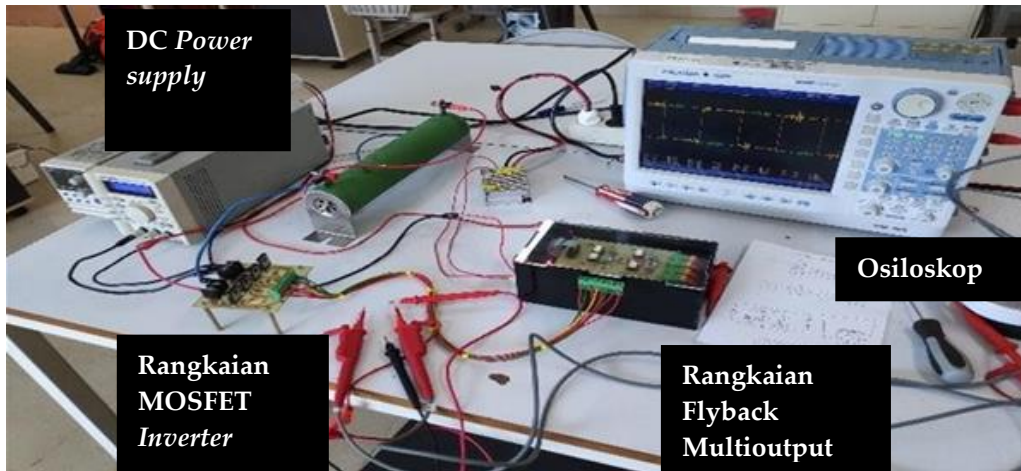
Sehingga tegangan output dapat dinyatakan dengan:

$$V_{op} = V_s \left( \frac{D}{1-D} \right) \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (20)$$

atau

$$V_{on} = V_s \left( \frac{D}{1-D} \right) \left( \frac{N_3}{N_1} \right) \quad (21)$$

### 3. Hasil Dan Pembahasan



Gambar 4. Rangkaian pengujian alat beserta alat ukur dan pendukung

Pengujian konverter yang diusulkan tampak pada Gambar 4. Rangkaian *flyback* multioutput diujikan pada rangkaian *inverter* yang terdiri dari MOSFET yang beroperasi sebagai *switching devices low side* dan *high-side*. Pada pengujian ini respon tegangan dan arus direkam dengan osiloskop DL850 Yokogawa.

Konverter didesain untuk menghasilkan tegangan bias positif sebesar 14 V dan tegangan bias negatif sebesar -6 V. Dengan desain untuk digunakan pada MLI tiga tingkat [13], maka konverter didesain dengan 4 output dengan sepasang tegangan bias positif dan negatif untuk setiap output. Pada Gambar 5 nampak konverter yang menggunakan satu inti trafo frekuensi tinggi dengan kumparan sekunder 4 buah, di mana kumparan untuk tegangan bias positif dan negatif dalam satu kumparan dengan *centre tap*. Hasil pengukuran trafo dengan menggunakan *LCR meter* ditunjukkan pada Tabel 1. *Flyback* dioperasikan dengan frekuensi *switching* sebesar 40 kHz.



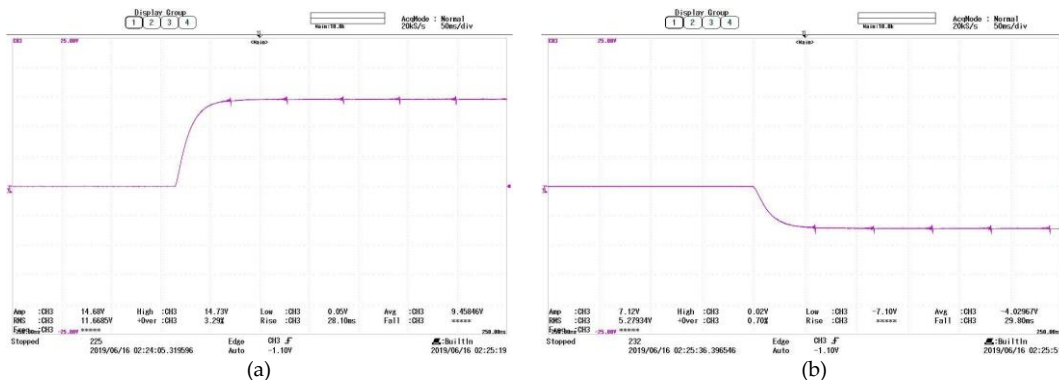
Gambar 5. Rangkaian Flyback multioutput

Tabel 1. Spesifikasi trafo frekuensi tinggi pada *flyback*

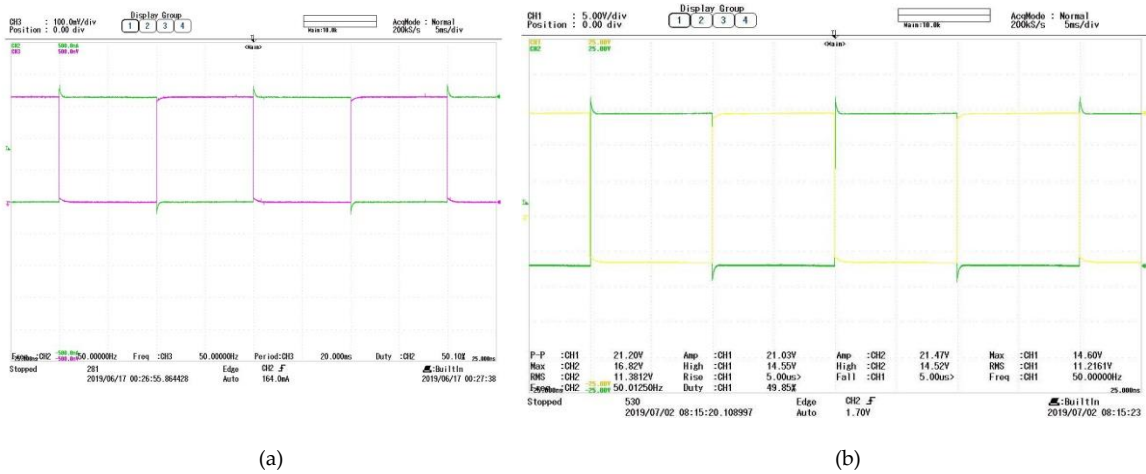
Kumpulan Trafo	Nilai
Primer	$N_1=42, R=0,5 \Omega, L_m=2,23 \text{ mH}$
Sekunder 1	$N_2=27, R_{N_2}=0,6 \Omega, L_{N_2}=2,14 \text{ mH}$ $N_3=12, R_{N_3}=0,4 \Omega, L_{N_3}=0,22 \text{ mH}$
Sekunder 2	$N_2=27, R_{N_2}=0,6 \Omega, L_{N_2}=2,03 \text{ mH}$ $N_3=12, R_{N_3}=0,4 \Omega, L_{N_3}=0,22 \text{ mH}$
Sekunder 3	$N_2=27, R_{N_2}=0,6 \Omega, L_{N_2}=2,15 \text{ mH}$ $N_3=12, R_{N_3}=0,4 \Omega, L_{N_3}=0,23 \text{ mH}$
Sekunder 4	$N_2=27, R_{N_2}=0,6 \Omega, L_{N_2}=2,05 \text{ mH}$ $N_3=12, R_{N_3}=0,4 \Omega, L_{N_3}=0,20 \text{ mH}$

Gambar 6 menunjukkan respon output konverter *flyback* yang diamati selama 0,5 detik. Osiloskop dioperasikan dengan  $V/\text{div}=5 \text{ volt/div}$  dan  $\text{time/div}$  sebesar  $50\text{ms/div}$ . Respon tegangan bias positif pada Gambar 6a menunjukkan kondisi *steady state* pada tegangan 14,68 volt converter memerlukan waktu *rise time* sebesar 28,01ms dengan *overshoot* sebesar 3,28%. Sedangkan pada Gambar 6b menunjukkan respon tegangan bias negatif *steady state* pada tegangan -6k53 V, *rise time* sebesar 29k80 ms dengan *overshoot* sebesar 0,70%.

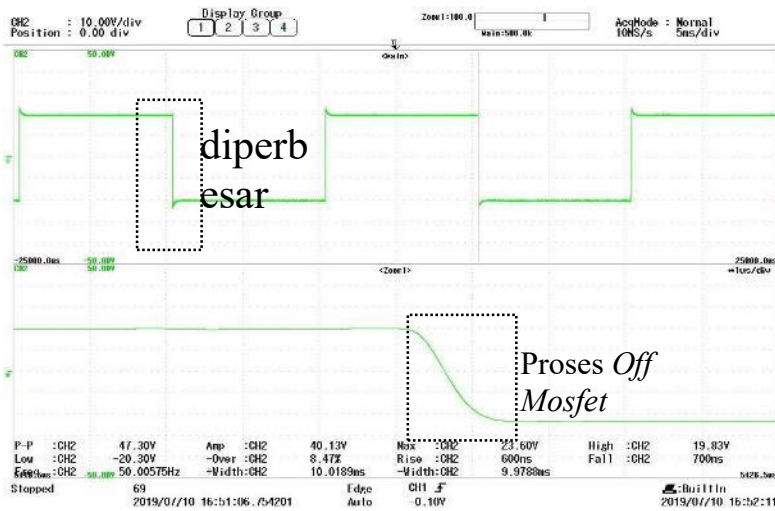
Pada Gambar 7, konverter diujikan untuk menyuplai daya *gate driver* pada *inverter*. *Inverter* dioperasikan dengan frekuensi *switching* 10 KHz menggunakan modulasi PWM dengan duty 50%. Gambar 7a menunjukkan respon tegangan  $V_{gs}$  dan Gambar 7b respon tegangan  $V_{gs}$  pada MOSFET dengan pengoperasian osiloskop  $\text{time/div}=20\mu\text{s/div}$  dan  $V/\text{div}=5\text{V/div}$ . Respon MOSFET menunjukkan tidak ada permasalahan dalam proses *turn-on* dan *turn-off* pada *switching device*.



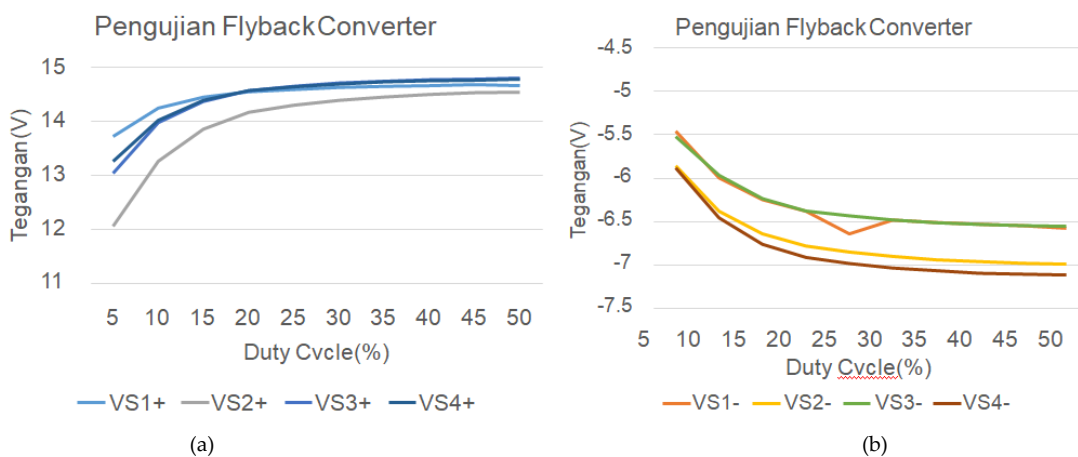
Gambar 6. Respon tegangan: (a) bias positif  $V_{op}$  dan (b) bias negatif  $V_{on}$



Gambar 7. Pengujian *gate driver*: (a) respon pada  $V_{gs}$  dan (b)  $V_{ds}$  MOSFET



Gambar 8. Respon  $V_{ds}$  MOSFET dengan gambar diperbesar



Gambar 9. Kinerja Flyback berdasarkan *duty cycle*: (a) Tegangan output positif dan (b) Tegangan output negatif



Pada Gambar 8 menunjukkan respon  $V_{ds}$  MOSFET dengan  $\text{time/div}=5 \text{ ms/div}$  dan  $\text{V/div}=10 \text{ v/div}$ . Untuk Gambar 8 bawah adalah gambar atas yang diperbesar dengan  $\text{time/div}=1 \mu\text{s/div}$ . Pada Gambar 8 bawah bisa dilihat proses switching mosfet berubah dari kondisi dari on menuju off secara sempurna.

Pada Gambar 9 dapat dilihat bahwa tegangan keluaran flyback cenderung konstan pada saat *duty cycle* mencapai 30%. Pada Gambar 9a pengujian output tegangan bias positif, semakin besar *duty cycle* nilai tegangan output *flyback* semakin besar secara linear. Namun pada saat *duty cycle* 30% output tegangannya relatif stabil dan tidak banyak mengalami perubahan. Untuk tegangan pada VS2+ memiliki sedikit perbedaan dibandingkan VS1+, VS3+, VS4+. Pada Gambar 9b juga menunjukkan hal yang sama, VS1- menghasilkan tegangan bias negatif paling rendah. Hal ini disebabkan oleh lilitan kumparan yang tidak ideal.

#### 4. Kesimpulan

Makalah ini menjelaskan tentang konverter flyback multioutput untuk menghasilkan tegangan bias positif dan negatif untuk suplai daya *gate driver*. Aplikasi dari konverter ini khususnya untuk suplai daya *gate driver* pada *multilevel inverter* yang membutuhkan banyak unit suplai daya untuk *gate driver*. Diharapkan desain ini dapat diaplikasikan dengan menggunakan komponen *SMD* yang ukurannya cukup kecil sehingga konverter bisa lebih ringkas.

#### Daftar Pustaka

- [1] M. Hagiwara, K. Nishimura, and H. Akagi, "A Medium-Voltage Motor Drive with A Modular Multilevel PWM Inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 7, pp. 1786–1799, Jul. 2010.
- [2] E. Najafi and A. H. M Yatim, "Design and Implementation of A New Multilevel Inverter Topology," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4148-4154, 2011.
- [3] F. Z. Peng, W. Qian, and D. Cao, "Recent Advances in Multilevel Converter/Inverter Topologies and Applications," In *Proc. IEEE 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA*, pp. 492-501, June 2010.
- [4] E. Babaei and S. S. Gowgani, "Hybrid Multilevel Inverter Using Switched Capacitor Units," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 4614-4621, 2013.
- [5] M. R. Banaei and S. Ebrahim, "New Multilevel Inverter with Reduction of Switches and Gate Driver," *J. of Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1129-1136, 2011.
- [6] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 899–907, Feb. 2013.
- [7] Y. Ye and K. E. Cheng, "Bootstrap Gate Driver and Output Filter of an SC-based Multilevel Inverter for Aircraft APU," In *Proc. IEEE 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, pp. 1-5, December 2015.

- [8] A. Stillwell and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "A Five-Level Flying Capacitor Multilevel Converter With Integrated Auxiliary Power supply and Start-Up," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2900-2913, 2018.
- [9] C. B. Barth, T. Foulkes, W. H. Chung, T. Modeer, P. Assem, Y. Lei, and R. C. Pilawa-Podgurski, "Design and Control of a GaN-based, 13-level, Flying Capacitor Multilevel Inverter," In *Proc. IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1-6, June 2016.
- [10] Z. Liao, Y. Lei, and R. C. Pilawa-Podgurski, "A GaN-based Flying-Capacitor Multilevel Boost Converter for High Step-Up Conversion," In *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1-7, September 2016.
- [11] Z. Ye, Y. Lei, W. Liu, P. S. Shenoy, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "Design and Implementation of a Low-Cost and Compact Floating Gate Drive Power Circuit for GaN-based Flying Capacitor Multi-level Converters," In *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2925-2931, 2017.
- [12] R. Zhao, D. Gladwin, X. Mou, and D. A. Stone, "A Non-Isolated Bipolar Gate Driver with Self-Driven Negative Bias Generator in High-Side-Only Application," In *Proc. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1362-1367, Oct 2018.
- [13] M. A. B. Nugroho, N. A. Windarko, and B. Sumantri, "Perancangan Kendali Multilevel Inverter Satu Fasa Tiga Tingkat dengan PI+ Feedforward pada Beban Nonlinier," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 7, no. 3, pp. 493-507, 2019.