



RFCS BIG TICKETS PROJECT

POSTEN

Scalable, innovative floating photovoltaic power plant using energy buffer storage and easily relocatable single-wire power transmission

PROJECT COORDINATOR



CONSORTIUM



RFCS BIG TICKETS PROJECT

POSTEN

Scalable, innovative floating photovoltaic power plant using energy buffer storage and easily relocatable single-wire power transmission



Co-funded by
the European Union

Modelowanie strat i sprawności w jedнопrzewodowej linii zasilającej SWET

Marcin Zygmanski

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki KENER

Wydział Elektryczny,

Politechnika Śląska w Gliwicach

Konwersatorium Inteligentna Energetyka

Gliwice, 27 Stycznia 2026



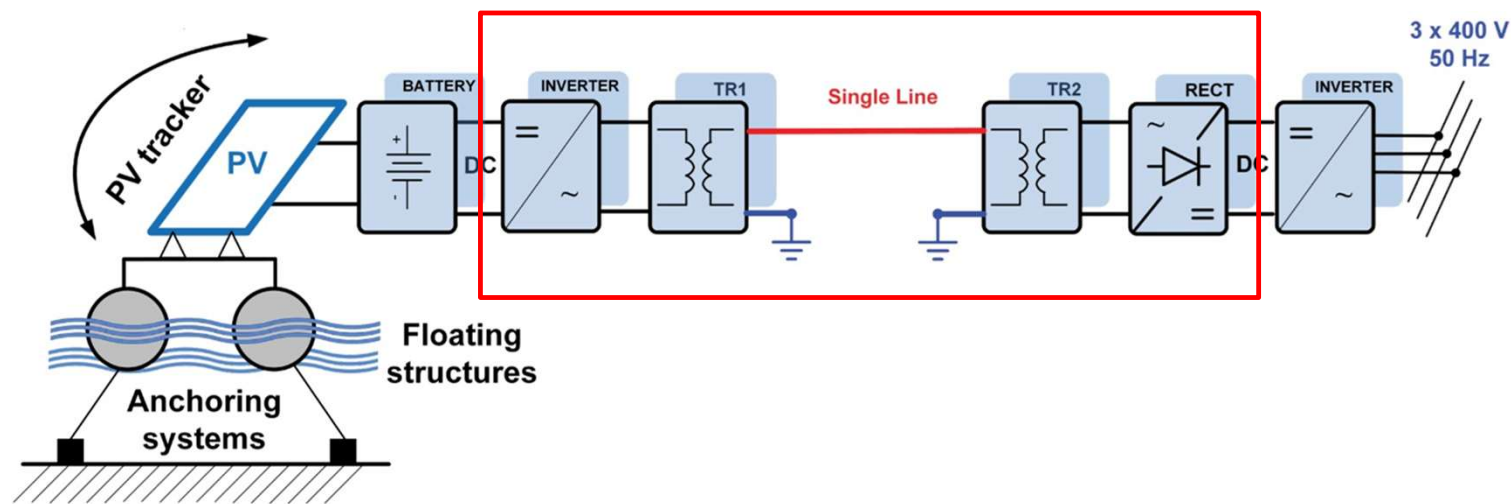
Silesian University
of Technology

KENER

Cel badań

Celem badań jest analiza strat mocy w układzie zasilania linii z pojedynczym przewodem SWET (Single Wire Energy Transfer), pracującej przy wysokim napięciu i wysokiej częstotliwości.

Przedstawione wyniki są wstępnymi rezultatami trwającego projektu POSTEN



Analiza strat mocy jest i będzie prowadzona na wszystkich etapach projektowania systemu.

System pracuje w podmokłym środowisku przemysłowym.

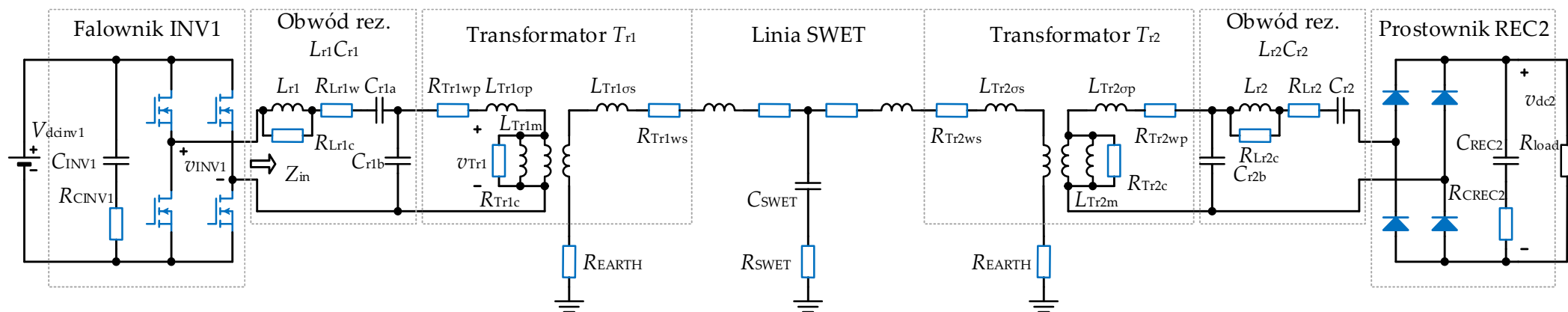
Cel badań

Celem badań jest przesył mocy elektrycznej do 100 kW przez pojedynczy przewód, z wykorzystaniem ziemi jako przewodu powrotnego.

Kolejnym celem jest zapewnienie wystarczająco wysokiej sprawności przesyłu energii (powyżej 90%) w różnych warunkach atmosferycznych.

Napięcie linii SWET wyniesie do 5 kV, a częstotliwość przesyłu energii 10 kHz.

W systemie SWET istnieje wiele elementów, w których mogą występować straty mocy.

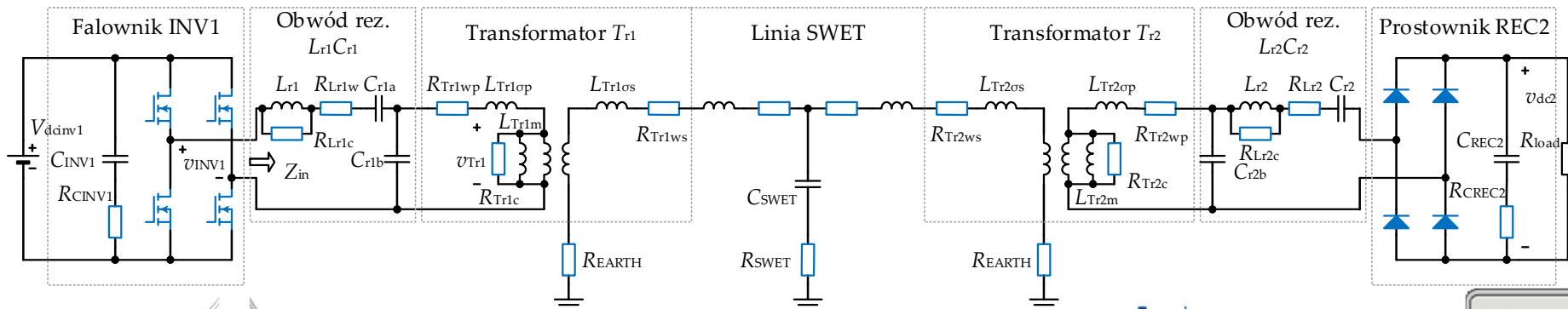


Opis układu

Istnieje wiele możliwości rozwiązania układu (transformatory o niejednakowych przekładniach, wyższe napięcie SWET).

Analiza pracy przekształtnika rezonansowego ma charakter wielokryterialny:

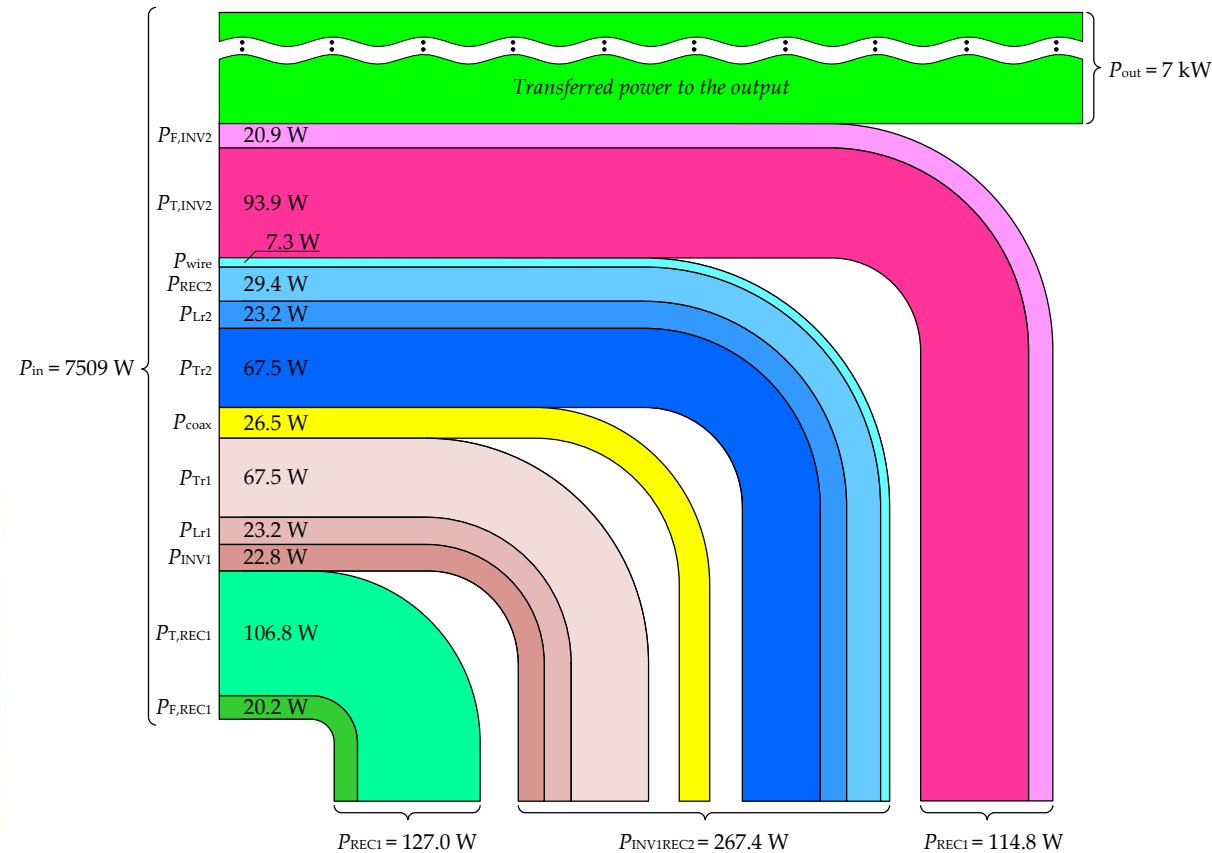
1. Straty w systemie powinny być możliwie małe.
2. Maksymalna moc przesyłana przez falownik powinna być ≥ 100 kW.
3. W przekształtniku nie powinna występować moc bierna (gabaryty elementów).
4. Jeśli to możliwe, falownik INV powinien pracować w warunkach ZVS.



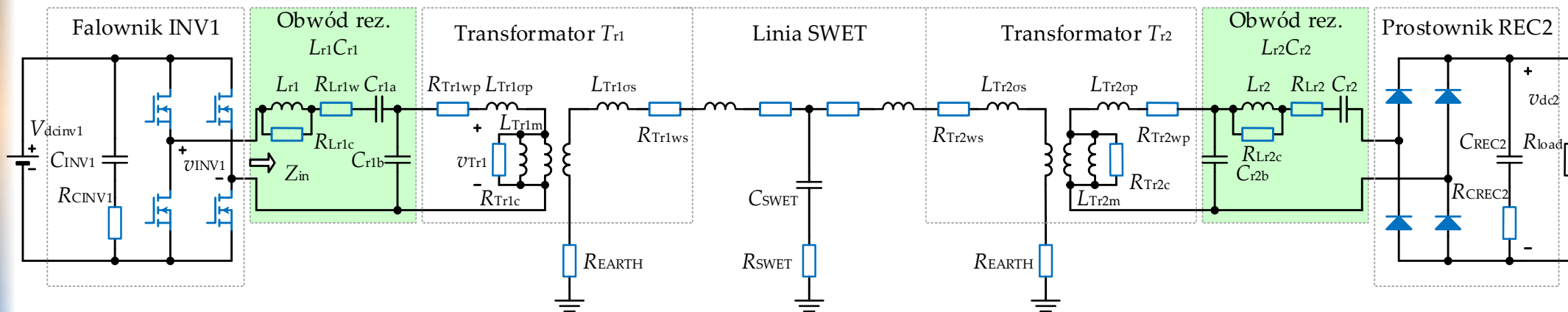
Projekt HEET – skończony w 2023 roku



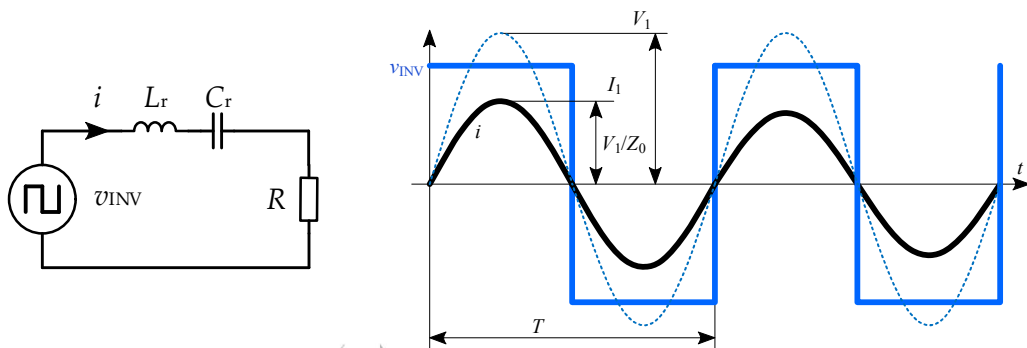
Moc wyjściowa systemu zasilania wynosiła 7 kW (sprawność 93%)



Obwód rezonansowy projekt POSTEN



Przyjmuje się, że obwody rezonansowe, linia SWET oraz transformatory mogą zostać zredukowane do jednego szeregowego obwodu rezonansowego



$$V_{dcinv} = 750 \text{ V} \Rightarrow V_1 = \frac{4}{\pi} \cdot 750 \text{ V} = 954,9 \text{ V}$$

$$P = \frac{V_1}{\sqrt{2}} \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 100 \text{ kW} \Rightarrow I_1 = \frac{2P}{V_1} = 209,44 \text{ A}$$

$$I_{1rms} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 148,1 \text{ A}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} < \frac{V_1}{I_1} = 4,56 \Omega$$

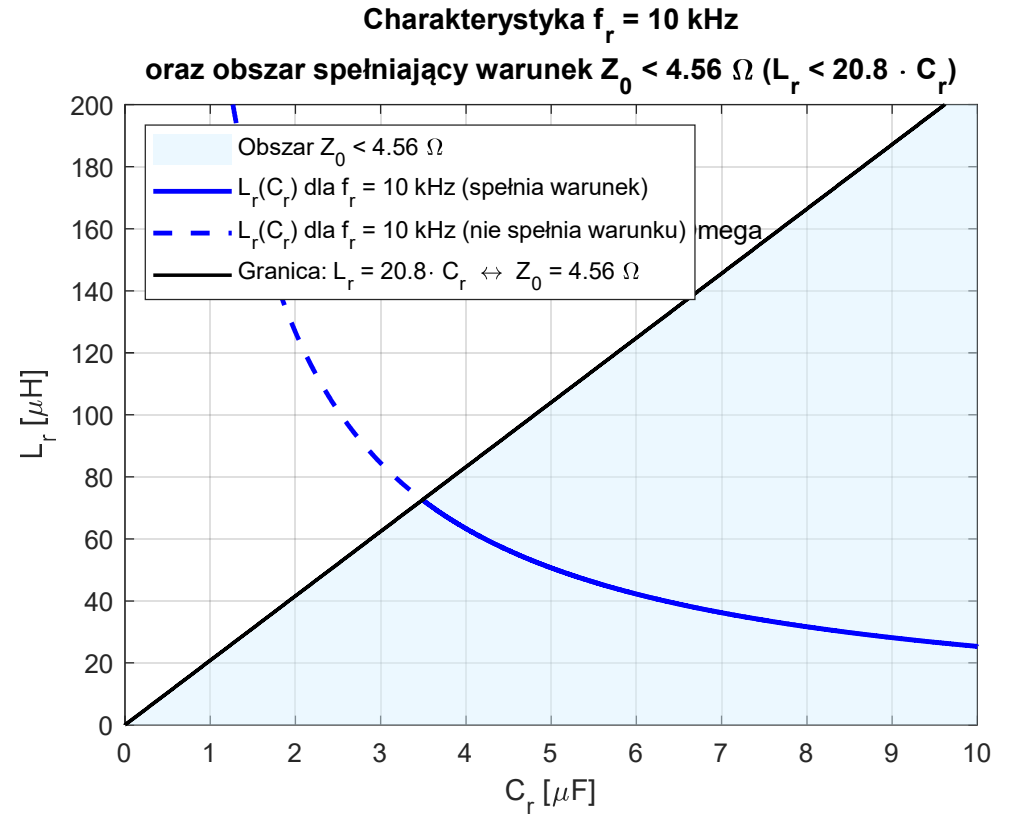
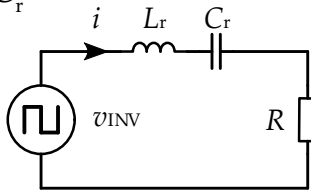
Obwód rezonansowy

W prostym obwodzie rezonansowym muszą być spełnione dwa warunki::

1. Częstotliwość rezonansowa powinna być ustawiona na stałą wartość $f_r = 10$ kHz.
2. Impedancja charakterystyczna Z_0 powinna być mniejsza niż $4,56 \Omega$

$$1: f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} = 10 \text{ kHz} \Rightarrow L_r = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_r}$$

$$2: Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} < 4,56 \Omega \Rightarrow L_r < C_r (4,56 \Omega)^2$$



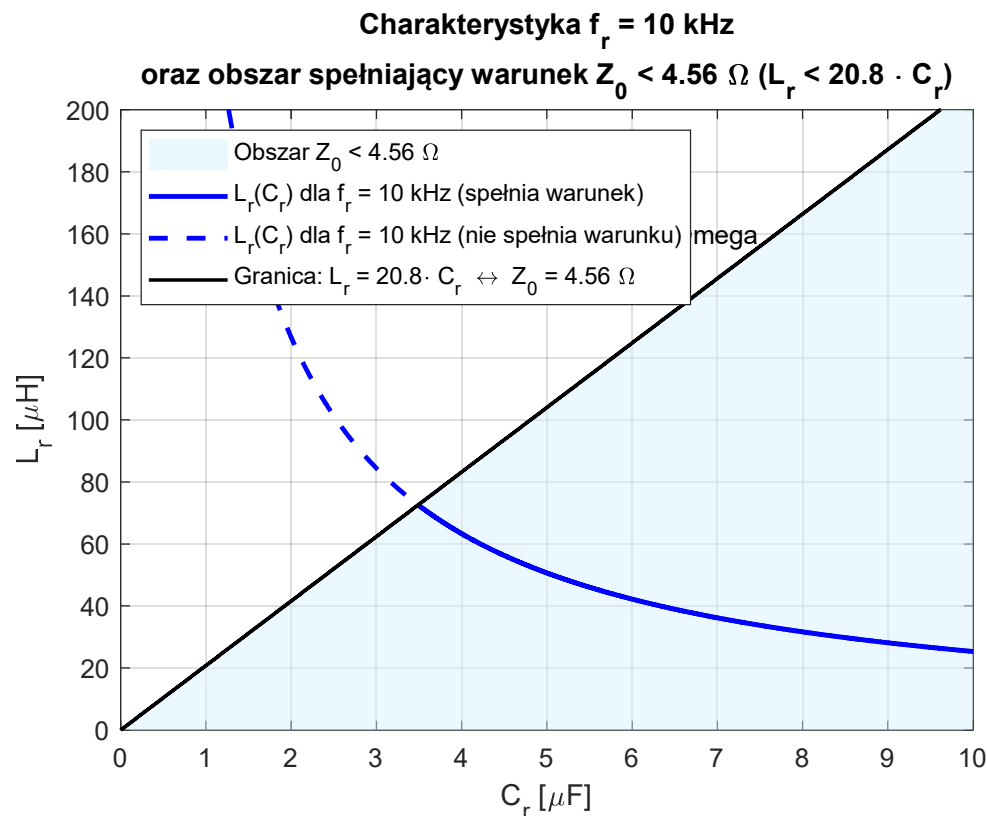
Obwód rezonansowy

Pytanie 1: Czy obwód rezonansowy systemu SWET można modelować za pomocą prostego szeregowego obwodu rezonansowego?

Jest to bardziej złożony układ, który można przedstawić jako sieć typu T, sieć typu Γ , odwróconą sieć typu Γ lub jako kaskadowe połączenie takich sieci.

Pytanie 2: Czy możliwe jest zmniejszenie indukcyjności obwodu rezonansowego w taki sposób, aby wpływ indukcyjności rozproszenia transformatora nie był problematyczny?

Parametry transformatora nie są jeszcze znane, jednak przewidywana indukcyjność rozproszenia może wynosić kilkadziesiąt mikrohenrów.



Straty mocy w przekształtniku INV1



Użyty zostanie następujący moduł SiC

CAS350M12BM3,
CAS350M12BM3T

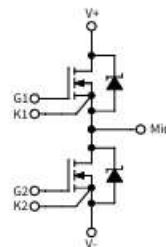
1200 V, 350 A, Silicon Carbide, Half-Bridge Module

Technical Features

- Industry Standard 62 mm Footprint
- Ultra Low Loss, High-Frequency Operation
- Zero Reverse Recovery from Diodes
- Zero Turn-off Tail Current from MOSFET
- Normally-off, Fail-safe Device Operation
- Copper Baseplate and Aluminum Nitride Insulator



V_{DS} 1200 V
 I_{DS} 350 A



$$R_{DSon} = 6.5 \text{ m}\Omega$$

$$P_{cond} = (150 \text{ A})^2 \cdot 6.5 \text{ m}\Omega = 146.3 \text{ W}$$

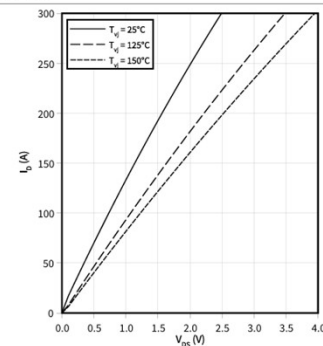
$$\text{switching loss } P_{sw} = 10 \text{ kHz} \cdot 5 \text{ mJ} = 50 \text{ W} \text{ !!!! hard switching}$$

Total losses in inverter

$$P_{loss} = 2P_{cond} + 4P_{sw} = 500 \text{ W}$$

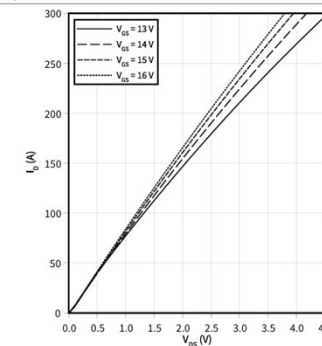
Output characteristic (typical), MOSFET

$I_D = f(V_{DS})$
 $V_{GS} = 15 \text{ V}$



Output characteristic (typical), MOSFET

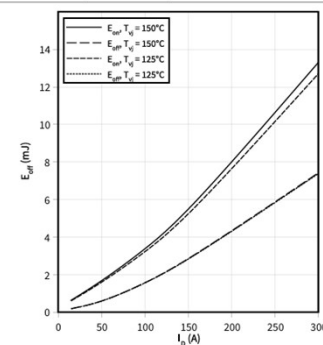
$I_D = f(V_{DS})$
 $T_{vj} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$



Switching losses (typical), MOSFET

$E_{off} = f(I_D)$, $E_{on} = f(I_D)$

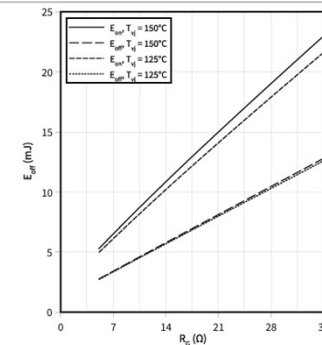
$V_{DS} = 600 \text{ V}$, $R_{G,off} = 5.1 \text{ }\Omega$, $R_{G,on} = 5.1 \text{ }\Omega$, $V_{GS} = \pm 15 \text{ V}$



Switching losses (typical), MOSFET

$E_{off} = f(R_G)$, $E_{on} = f(R_G)$

$I_D = 150 \text{ A}$, $V_{DS} = 600 \text{ V}$, $V_{GS} = -5/15 \text{ V}$



Silesian University of Technology

KENER

Straty w dławiku i transformatorze

W zakończonym projekcie HEET przesyłana moc wynosiła 7 kW, a napięcie falownika oraz częstotliwość przełączania były podobne: $V_{dc} = 750 \text{ V}_{dc}$, $f_S = 10 \text{ kHz}$.

Zastosowano dławik o indukcyjności 1040 μH i rezystancji 25 $\text{m}\Omega$.

Rezystancje uzwojeń transformatora po stronie niskiego i wysokiego napięcia wynosiły odpowiednio 100 $\text{m}\Omega$ oraz 1,2 Ω .

Zakładając, że w projekcie POSTEN znamionowa przesyłana moc wynosi 100 kW ($I_{1,\text{rms}} = 150 \text{ A}$) i jest ponad 10-krotnie większa niż w projekcie HEET, a rezystancje elementów indukcyjnych będą 10 razy mniejsze, wówczas straty mocy w ich uzwojeniach wyniosą:

$$P_{Lw} = R_{Lw} I_{1,\text{rms}}^2 = 2,5 \text{ m}\Omega \cdot (150 \text{ A})^2 = 56 \text{ W}$$

$$P_{Trwp} = R_{Trwp} I_{1,\text{rms}}^2 = 10 \text{ m}\Omega \cdot (150 \text{ A})^2 = 225 \text{ W}$$

$$P_{Trws} = R_{Trws} I_{1,\text{rms}}^2 = 120 \text{ m}\Omega \cdot \left(\frac{150 \text{ A}}{4}\right)^2 = 168 \text{ W}$$

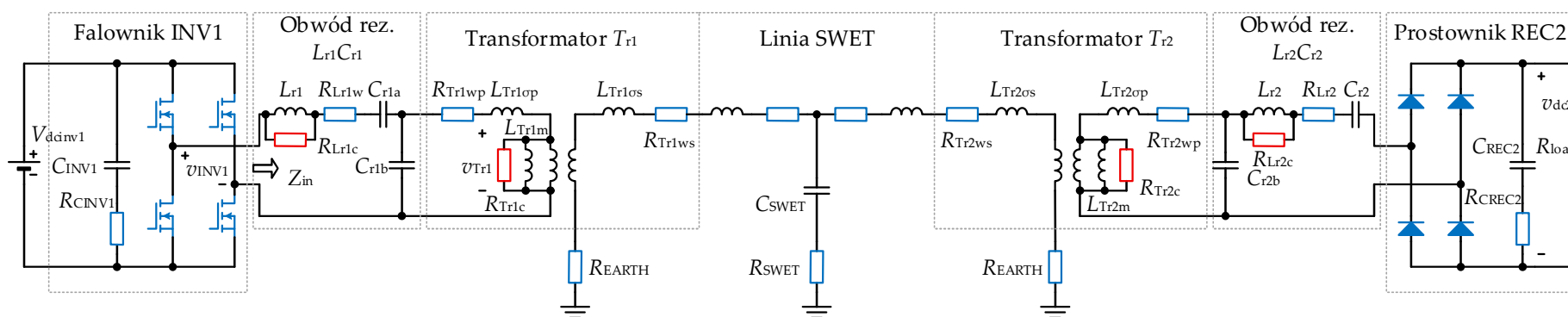
Łącznie straty wyniosą około 900 W, co stanowi 0,9% mocy wyjściowej P_{out}

Straty w rdzeniu dławika i transformatora

Straty w rdzeniu dławika są proporcjonalne do prądu płynącego przez dławik i są około sześciokrotnie większe niż straty w uzwojeniu dławika – ok. 300 W.

Straty w rdzeniu pojedynczego transformatora mogą sięgać nawet 1 kW. Są one niezależne od przesyłanej mocy i mogą powodować obniżenie sprawności przy przesyłce małych mocy w linii SWET.

Łączne straty w rdzeniach elementów magnetycznych w całym systemie, przy mocy znamionowej, mogą wynosić 2,6 kW, co stanowi 2,6% mocy wyjściowej P_{out} .

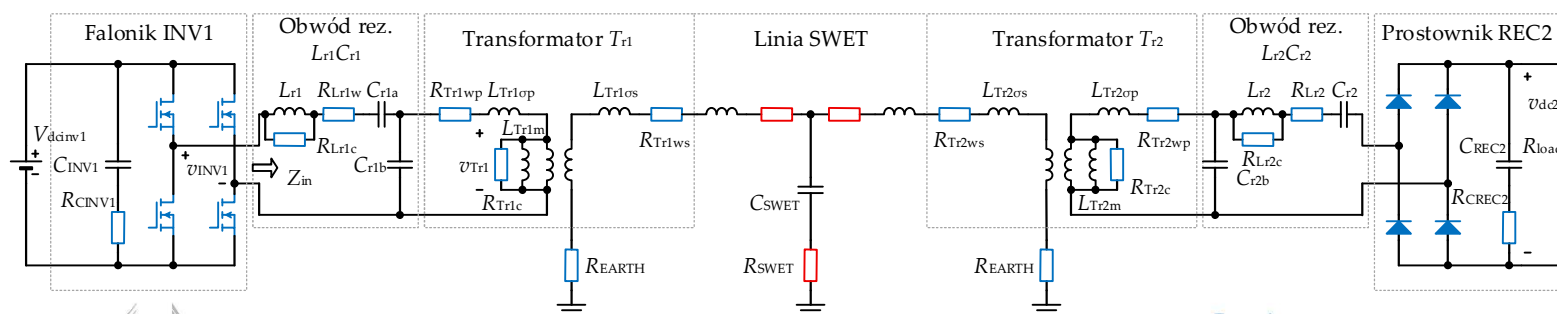


Straty w linii SWET

W zależności od przekładni transformatora (planowo 1:5), prąd w linii SWET przy mocy 100 kW wyniesie 30 A. Oznacza to, że każdy 1Ω w linii SWET wywołuje straty mocy rzędu 900 W, co stanowi spadek sprawności o 0,9%.

Najbardziej prawdopodobnym kablem zastosowanym do budowy linii SWET będzie kabel ELTRIM ECOPAS CCST 50-AL3 WK 20 kV, o przekroju czynnego przewodu 35 mm^2 i rezystywności materiału przewodnika $32,53 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$. Rezystancja przewodu przy częstotliwości 50 Hz wynosi $0,986 \Omega/\text{km}$.

Przy częstotliwości 10 kHz rezystancja kabla jest większa ze względu na efekt naskórkowy i oczekuje się, że wyniesie około $2 \Omega/\text{km}$. Oznacza to, że spodziewane straty mocy w linii SWET o długości 1 km wyniosą około 1,8 kW, co stanowi 1,8% mocy znamionowej.



Straty w prostowniku REC2

W prostowniku REC2 planuje się zastosowanie dwóch modułów diod SiC, np. MSCDC300A120AG (1200 V / 300 A) firmy Microchip

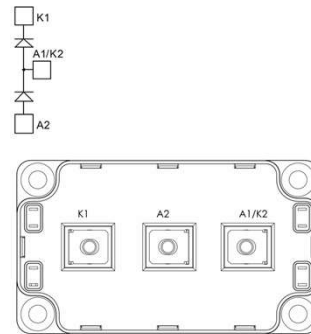
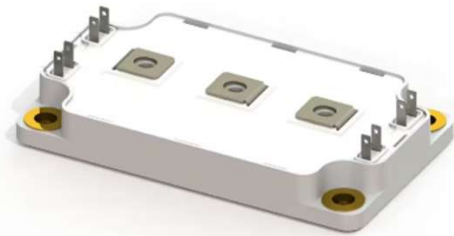
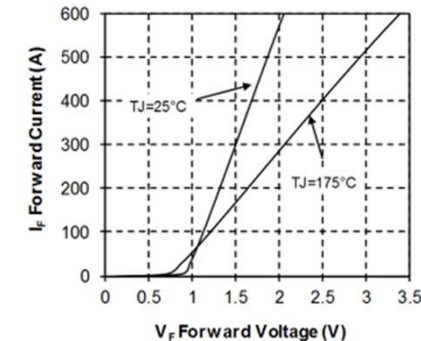


Figure 2 • Forward Current vs. Forward Voltage



Straty przewodzenia we wszystkich czterech diodach prostownika REC1 wyniosą:

$$P_{condREC1} = 4 \frac{I_1}{\pi} V_F = 4 \frac{210 \text{ A}}{\pi} 1.3 \text{ V} = 350 \text{ W}$$

Straty przełączania wynikające z ładunku pojemnościowego wyniosą:

$$P_{swREC1} = 4 V_{out} Q_C f_S = 4 \cdot 900 \text{ V} \cdot 1344 \text{ nC} \cdot 10000 \text{ Hz} = 50 \text{ W}$$

Całkowite straty mocy w prostowniku REC1 wyniosą 450 W.

Straty w całym układzie SWET

Szacunkowe straty mocy w systemie SWET z linią 1 km przy mocy znamionowej 100 kW

500 W

350 W

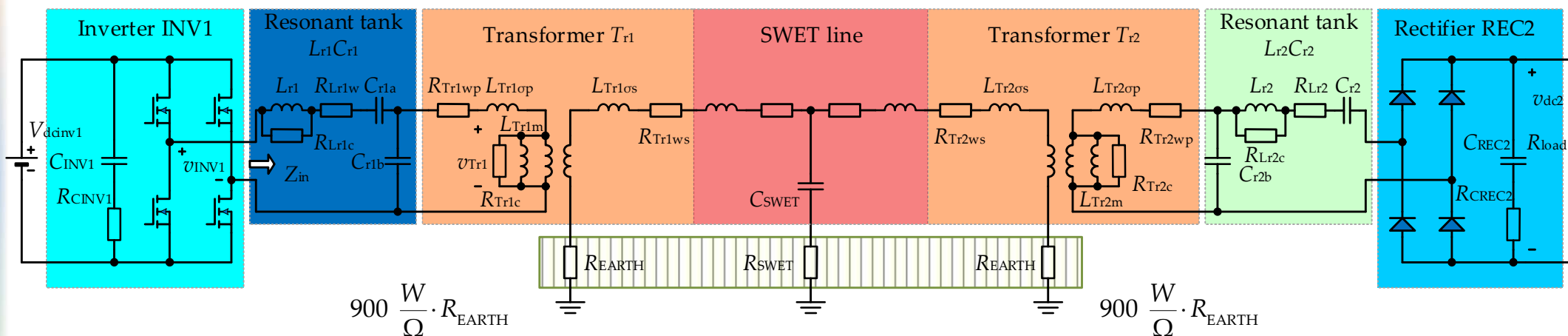
1400 W

1800 W

1400 W

350 W

450 W



Całkowite straty mocy w systemie SWET, bez uwzględnienia rezystancji uziemienia, wynoszą 6,25 kW, co stanowi 6,25% mocy wyjściowej.

1. W projekcie HEET II obliczone straty mocy dobrze odzwierciedlają rzeczywiste straty mocy w większości elementów systemu SWET.
2. Szacowane straty mocy w systemie SWET z linią o długości 1 km, przy mocy znamionowej 100 kW, wyniosą około 6,25 kW, powiększone o straty mocy na elektrodach uziemiających. Pokazuje to, że rezystancja elektrod uziemiających odgrywa kluczową rolę w całkowitej sprawności systemu.
3. Kolejnymi elementami generującymi znaczne straty mocy są transformatory. Zakłada się, że możliwe będzie ograniczenie strat mocy w transformatorach, w szczególności strat pochodzących z rdzenia