ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

Tadeusz GLINKA
Eugeniusz KAŁUŻA
Romuald GRZENIK
Zygmunt MOŁOŃ

TRANZYSTOROWA PRZETWORNICA TRAMWAJOWA 600/40/24

Streszczenie. W artykule zaproponowano zastąpienie tramwajowej przetwornicy elektromaszynowej PT 44/10 przetwornicą tranzystorową. Układ zastępujący przetwornicę elektromaszynową składa się z:
- przekształtnika DC/DC z 600 V na 40 V i 24 V,
- falownika o mocy 4 kW do zasilania silników wentylatorów,
- silnika indukcyjnego o mocy 3.0 kW napędzającego wentylatory.

Nowe rozwiązanie będzie lżejsze o 203 kg, co stanowi 69% masy przetwornicy PT44/10 i zmniejszy straty mocy czynnej o 1,65 kW, co stanowi 53% strat przetwornicy PT 44/10.

TRAMWAY TRANSISTOR CONVERTER 600/40v/24BV

Summary. The authors propose to exchange the existing PT44/10 motor-generator set for transistor converter. The new arrangement consists of:
- DC/DC converter, used for lowering the voltage from 600 to 40 and 24 V
- inverter for feeding fan motors (this inverter rates at 4 kW)
- induction motor rating at 3.0 kW, used for fan drives.

The new system will weigh 203 kg i.e 31 per cent less than the PT44/10 motor-generator set. The power losses will go down by 1.65 kW i.e.per cent.

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ТРАМВАЙНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕАь 600/40v/24BV

Резюме. В статье рассматривается возможность применения транзисторого преобразователя вместо электромашинного трамвайного преобразователя ПТ 44/10. Система, применяемся вместо электромашинного преобразователя включает:
- преобразователь DC/DC 600 В на 40 В и 24 В,
- инвэртор мошностью 4 кВт для питания двигателей вентиляторов,
- два асинхронных двигателя мошностью 1;5 кВт для привода вентиляторов.

Новое конструкционное решение преобразователя легче на 203 кг, что составляет 69 % массы преобразователя ПТ 44/10; менше также потери мощности в преобразователе на 1,65 кВт, что составляет 53 % потерь преобразователя ПТ 44/20 В.

1. WSTĘP

Przetwornica tramwajowa jest przeznaczona do zasilania obwodów pomocniczych tramwaju i ładowania akumulatora pokładowego. Przetwornicy tramwajowej stawia się następujące wymagania:

- napięcie zasilania prądu stałego 600 V zmieniające się w przedziale 400 V - 720 V, przy czym jest możliwy chwilowy wzrost napięcia do 800 V,
- parametry wyjściowe przetwornicy 2,7kW o dwóch stabilizowanych poziomach napięć 40 V; 52,5 A i 24 V; 25 A,
- napięcia wyjściowe przetwornicy muszą być galwanicznie oddzielone od napięcia sieci trakcyjnej.

W tramwajach dotychczas produkowanych i eksploatowanych typu 105N stosowana jest przetwornica elektromaszynowa składająca się z silnika prądu stałego o wzbudzeniu szeregowo-bocznikowym (5,1 kW; 600 V; 2000 obr/min) i prądnicy bocznikowej prądu stałego (2,7 kW; 40 V; 67 A; 2000 obr/min) zabudowanych we wspólnej obudowie i na wspólnym wale.

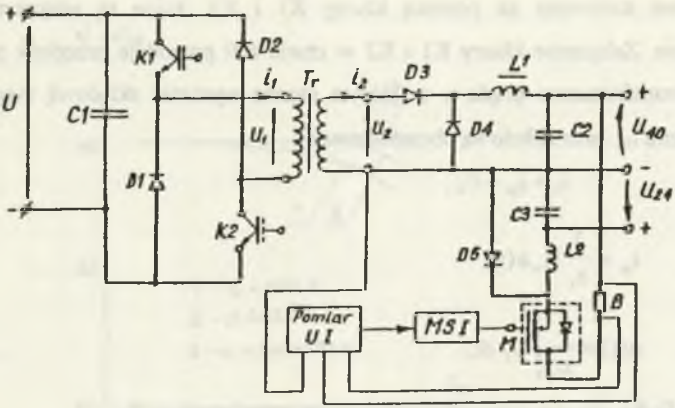
Na obydwu wolnych końcach wału są zabudowane wentylatory odśrodkowe. Wentylatory przewietrzają (chłodzą) silniki trakcyjne, rezystory rozrusznika i przetwornicę. Ponadto w tramwaju jest stosowany przekształtnik PTR 40/24 V, 25 A do zasilania świateł drogowych i urządzenia rozgłoszeniowego.

Zastępując przetwornicę elektromaszynową przetwornicą tranzystorową należy równocześnie zapewnić chłodzenie silników i rezystorów rozruchowych na dotychczasowym poziomie. Funkcje obecnej przetwornicy może spełniać [1]:

- przetwornica tranzystorowa 600/40/24 V pełniąca funkcje źródła napięcia pokładowego,
- falownik napięcia przetwarzający napięcie sieci trakcyjnej na 3-fazowe napięcie zmienne 3x380 V; 30:70 Hz o mocy 4 kW, którego pośrednictwem jest zasilany silnik wentylatorów 3,0 k W; 3x380 V; 60 Hz .

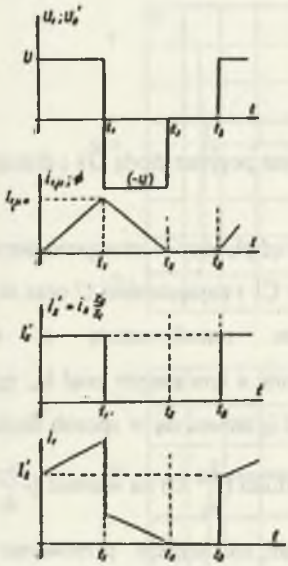
2. PRZETWORNICA TRAMWAJOWA

Schemat ideowy obwodu głównego przetwornicy przedstawiono na rys.1 [2.3]. Obwód pierwotny przetwornicy składa się z uzwojenia pierwotnego transformatora Tr, kluczy K1 i K2 zbudowanych przy wykorzystaniu tranzystorów IGBT, diod D1 i D2 oraz kondensatora C1.



Rys.1. Schemat ideowy obwodu głównego przetwornicy DC/DC

Fig.1. The circuit diagram of the main circuit of DC/DC converter



Rys.2. Przebiegi czasowe napięcia i prądu transformatora

Fig.2. The transformer voltage and current time courses

Obwód wtórny przetwornicy o napięciu wyjściowym 40V obejmuje uzwojenie wtórne transformatora Tr , diody D3 i D4 i filtr wyjściowy składający się dławika i kondensatora C2. Wyjście przetwornicy o napięciu 24 V uzyskuje się poprzez obniżenie napięcia 40 V za pomocą przerywacza M zbudowanego na tranzystorze polowym sterowanym regulatorem szerokości impulsu MSI, przy czym kondensator C3 i indukcyjność L2 pełnią funkcję filtru wyjściowego, bocznik B służy do pomiaru prądu obciążenia.

Układ jest sterowany za pomocą kluczy K1 i K2, które są włączone i wyłączone równocześnie. Załączenie kluczy K1 i K2 w chwili t=0 powoduje przepływ przez uzwojenie pierwotne transformatora prądu i_1 w którym można wyróżnić składową magnesującą rdzeń transformatora $i_{1\mu}$ oraz składową obciążeniową i'_2

$$i_1 = i_{1\mu} + i'_2, \tag{1}$$

przy czym

$$i_{1\mu} = \frac{1}{z_1} R_m \phi(t), \tag{2}$$

$$\phi(t) = \frac{1}{z_1} \int_0^t U_1 \, dt, \tag{3}$$

gdzie: z_1 - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego transformatora Tr,

R_m - reluktancja rdzenia transformatora Tr,

$\phi(t)$ - strumień magnetyczny w rdzeniu transformatora Tr.

Z równań (2) i (3) wynika, że strumień (t) i prąd i_1 narastają liniowo. Na uzwojeniu wtórnym transformatora indukuje się napięcie

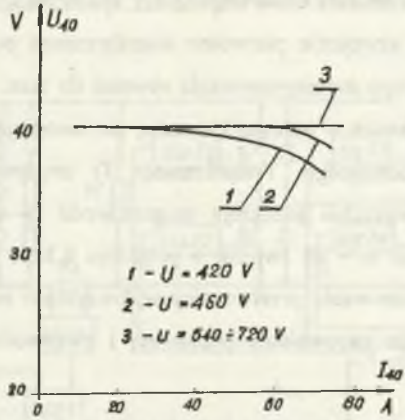
$$u_2 = z_2 \frac{d(t)}{dt} \tag{4}$$

o wartości stałej.

Napięcie U_2 jest źródłem prądu obciążenia i_2, który płynie poprzez diodę D3 i dławik L1 do kondensatora C2 i odbiorów.

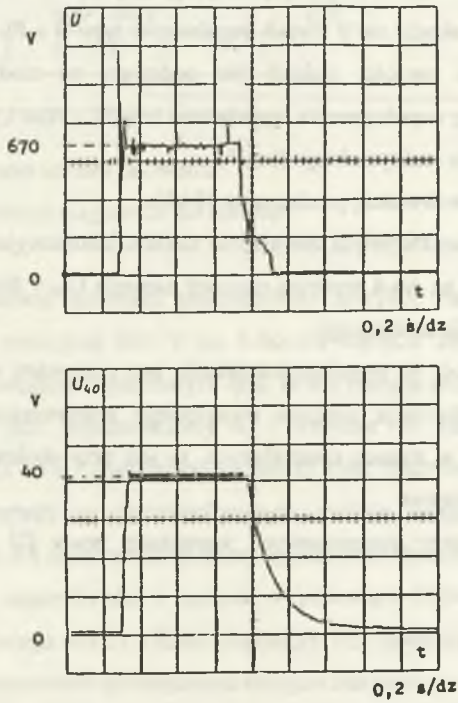
Wyłączenie kluczy K1 i K2 w chwili t_1 powoduje, że prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym transformatora zamyka się poprzez diodę D2, kondensator C1 i napięcie sieci U oraz diodę D1, co powoduje rewersję napięcia na uzwojeniu transformatora z wartości $U_1 = U$ na $U_1 = -U$. Strumień $\phi(t)$ w rdzeniu transformatora, a tym samym prąd $i_{1\mu}$, zgodnie z równaniami (3) i (2), zaczną się zmniejszać do zera. Prąd i_2 zmieni się w sposób skokowy do zera, zmianę tę wymusi skokowa zmiana napięcia U_2 z wartości ($\frac{z_2}{z_1}$ U) na wartość ($-\frac{z_2}{z_1}$ U), co spowoduje zablokowanie diody D3. Napięcie i_2 prąd na wyjściu przetwornicy będą podtrzymywane przez kondensator C2 i dławik L1.

Gdy prąd $i_{1\mu}$, osiągnie wartość równą zero (chwila t_2), to spowoduje zablokowanie diod D1 i D2. Tym samym napięcie na uzwojeniach transformatora będzie równe zero ($U_1 = 0$; $U_2 = 0$) i stan ten będzie istniał do chwili t_3. Wtedy nastąpi załączenie kluczy K1 i K2 i cykl zostanie powtórzony. Warunkiem poprawnego działania tego układu jest przerywany przebieg



Rys.3. Charakterystyki zewnętrzne przetwornicy przy równych wartościach napęcia zasilania

Fig.3. The output characteristics of the converter at different supply voltages V



Rys.4. Przebiegi napięcia U i U_{40} przy załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilającego

Fig.4. The time courses of voltages V and V_{40} during switchings on and off of the supply voltage

prądu i_1, to znaczy istnienie przedziału czasowego (t_3-t_2), w którym i_1 = 0. Dzięki temu każdy cykl załączenia napięcia na uzwojenie pierwotne transformatora powoduje magnesowanie rdzenia od zera, a następnie jego rozmagnesowanie również do zera. Tym samym, mimo że prąd w uzwojeniach płynie zawsze w jednym kierunku, nie następuje magnesowanie rdzenia składową stałą prądu magnesującego. Transformator Tr zbudowano używając rdzenia ferrytowego typu EC o powierzchni przekroju magnetowodu 24 cm^2. Uzwojenia zostały wykonane z taśmy miedzianej: z_1 = 38 zwojów o przekroju 0,3x50 mm^2, z_2 = 9 zwojów o przekroju 0,5x50 mm^2. Do sterowania przetwornicy wykorzystano monolityczny stabilizator impulsów MSI 3260. W celu zapewnienia poprawnej i niezawodnej pracy przetwornicy wyposażono ją w:

- sieć obciążającą ograniczającą przepięcia komutacyjne w tranzystorach w momencie wyłączenia i przenoszącą straty mocy z tranzystorów na rezystory,
- układ stabilizacji napięcia wyjściowego i ograniczający prąd zwarcia,
- układ zabezpieczający przetwornicę od przepięć występujących w sieci trakcyjnej.

Układ stabilizacji napięcia składa się z dwóch regulatorów typu P i PI. Zmiana napięcia wyjściowego w stosunku do wartości zadanej jest podawana na modulator szerokości impulsów i wpływa na zmianę współczynnika wypełnienia (reg.PI - czas t_1). Podobnie układ działa przy przekroczeniu prądu maksymalnego (reg.P).

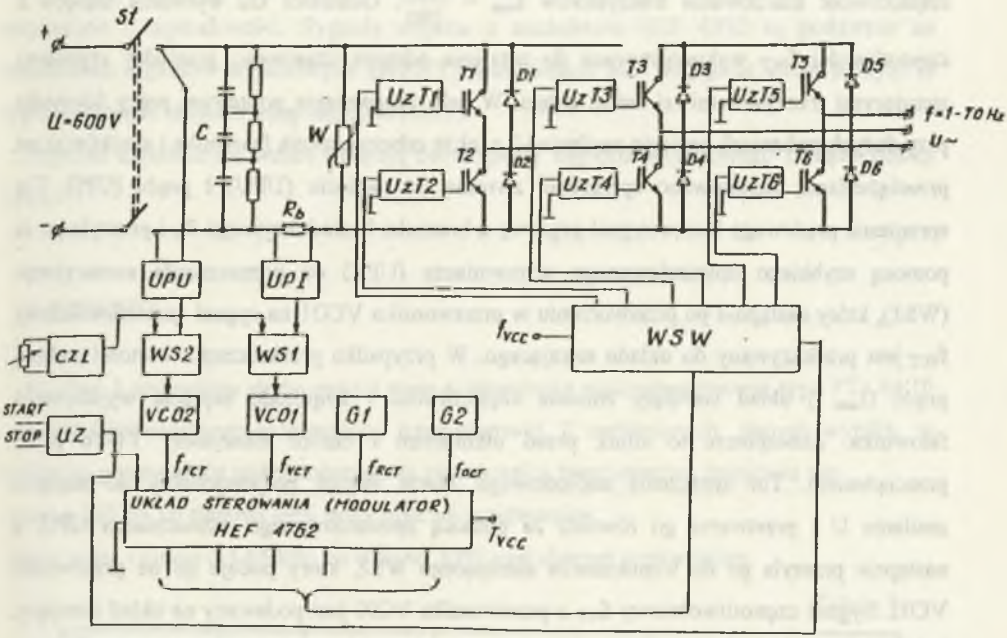
Przetwornica pracuje z częstotliwością przełączania 18 kHz.

Na rys.3 przedstawiono charakterystyki zewnętrzne modelu laboratoryjnego przetwornicy U_{40} = f(I_{40}) przy U = const, a na rys.4 przebieg czasowy napięcia U_{40} = f(t) przy skokowym załączeniu i wyłączeniu napięcia zasilającego.

Z charakterystyk tych widać, że przetwornica pracuje bez zastrzeżeń w całym zakresie zmian napięcia zasilania, stabilizacja napięcia wyjściowego przetwornicy jest poprawna. Zachowanie się przetwornicy w stanach nieustalonych, to jest przy skokowym załączeniu i wyłczeniu obciążenia, jest poprawne.

Sprawność przetwornicy przy znamionowych warunkach pracy (U = 600V; P_{40} + P_{20} = 2,7 kW wynosiła 85%.

3. FALOWNIK ZASILAJĄCY SILNIKI WENTYLATORÓW



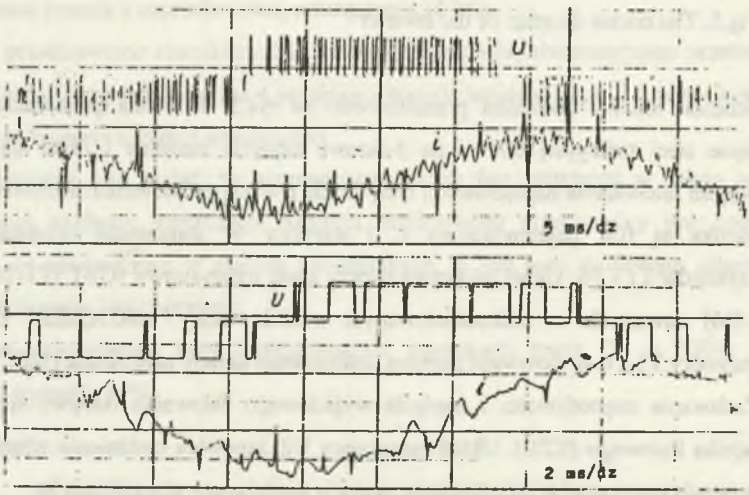
Rys.5. Schemat ideowy falownika

Fig.5. The circuit diagram of the inverter

Schemat ideowy falownika przedstawiono na rys.5. Falownik przetwarza bezpośrednio napięcie sieci trakcyjnej 600 V na 3-fazowe napięcie zmienne i różni się od typowych rozwiązań falowników napięciowych tym, że nie posiada prostownika sieciowego. Na wejściu falownika są filtr pojemnościowy C i warystor W stanowiące ochronę przepięciową tranzystorów T1 - T6. Układ falownika tworzy sześć tranzystorów IGBT (T1-T6) i sześć diod (D1-D6) zawartych w elektroizolowanym module mocy MB25QbES1 firmy Toshiba. Tranzystory T1-T6 są sterowane poprzez optoizowane układy załączające (UZT).

Zadawanie częstotliwości i napięcia wyjściowego falownika odbywa się przy pomocy zadajnika liniowego (CZL). Układ załączający UZ zapewnia opóźnienie włączenia sygnałów sterujących tranzystorów po załączeniu napięcia zasilającego stycznikiem St.

Generator G1 wytwarza sygnał napięciowy o częstotliwości f_{RCT} determinujący maksymalną częstotliwość kluczowania tranzystorów $f_{max} = \frac{f_{RCT}}{280}$. Generator G2 wytwarza napięcie o częstotliwości f_{OCT} wykorzystywane do ustalenia odstępu czasowego pomiędzy sygnałami sterującymi tranzystorami tej samej gałęzi. W celu zapewnienia poprawnej pracy falownika przy dużych wahaniach napięcia zasilania U, a także zabezpieczenia falownika i silników przed przeciążeniami, zastosowano sprzężenia zwrotne od napięcia (UPU) i prądu (UPI). Tor sprzężenia prądowego bierze sygnał prądowy z bocznika bezindukcyjnego R_b i przesyła go za pomocą szybkiego optoizolowanego wzmacniacza (UPZ) do wzmacniacza sumacyjnego (WS1), który następnie po przetworzeniu w przetworniku VCO1 na sygnał częstotliwościowy f_{VCT} jest przekazywany do układu sterującego. W przypadku przekroczenia wartości zadanej prądu (I_{max}) układ sterujący zmienia częstotliwość i amplitudę napięcia wyjściowego falownika. Zabezpiecza to silnik przed utknięciem i chroni tranzystory T1-T6 przed przeciążeniem. Tor sprzężenia napięciowego bierze sygnał proporcjonalny do napięcia zasilania U i przetwarza go również za pomocą optoizolowanego wzmacniacza UPU, a następnie przesyła go do wzmacniacza sumującego WS2, który podaje go na przetwornik VC02. Sygnał częstotliwościowy f_{FCT} z przetwornika VC02 jest podawany na układ sterujący, który przeprowadza korektę napięcia wyjściowego falownika w zależności od zmiany napięcia zasilającego.



Rys.6. Przebiegi napięcia i prądu wyjściowego falownika przy dwóch częstotliwościach impulsowania

Fig.6. The time courses of inverter output voltage and current at two different switching frequencies

Układ sterujący jest zbudowany na bazie układu scalonego HEF 4752. Układ sterujący realizuje syntezę trójfazowej fali sinusoidalnej z modulacją szerokości impulsów o określonej amplitudzie i częstotliwości. Sygnały wyjścia z modulatora HEF 4752 są podawane na wzmacniacz sygnałów wyjściowych (WSW) dopasowujący pod względem energtycznym te sygnały do wejść układów załączających (UZT).

Przykład działania falownika ilustrują oscylogramy napięcia wyjściowego i prądu silnika (rys.6).

4. WNIOSKI

W tabeli 1 zestawiono straty mocy i masę przetwornicy elektromaszynowej typu PTa 44/10 i modelu laboratoryjnego przetwornicy tranzystorowej. Z zestawionych danych wynika, że zastępując przetwornicę elektromaszynową przetwornicą tranzystorową zmniejsza się:

- masę o 203 kg, co stanowi 69% masy obecnej przetwornicy,
- straty mocy czynnej o 1,65 kW, co stanowi 53% strat obecnej przetwornicy.

Tabela 1

Typ przetwornicy	Moc [kW]		Straty [kW]	Masa [kg]
Elektromaszynowa typu Pta 44/10				292*
- silnik	5,1	68,5	2,34	
- prądnica	2,7	78,5	0,74	
Tranzystorowa				
- przetwornik	2,7	85	0,48	23
- falownik	4,0	94	0,25	15
- silniki wentylatorów Sg, 100L-B4	3,0	81	0,70	32
- wentylatory	-	-	-	2 x 9,5
* w tym masa wentylatorów 19 kg				

Drugim poważnym efektem ekonomicznym będzie niezawodność pracy przetwornicy. Przetwornica elektromaszynowa jest zabudowana na podwoziu tramwaju i przy złych warunkach atmosferycznych do przetwornicy przedostaje się woda, co powoduje jej częste awarie. Układy tranzystorowe (przetwornica i falownik będą zabudowane w ścianie tylnej tramwaju i całkowicie zabezpieczone przed przedostaniem się wody. Tylko silniki wentylacyjne, indukcyjne klatkowe budowy zamkniętej mogą być narażone na działanie wody, jednak z uwagi na zamkniętą i szczelną budowę, nie powinno to zwiększać ich awaryjności.

Należy zwrócić uwagę także na różnice głośności pracy przetwornicy elektromaszynowej (81 dB) i silnika indukcyjnego (73 dB), co zmniejszy poziom szumu wewnątrz tramwaju, a tym samym poprawi komfort jazdy.

LITERATURA

1. Kałuża E., Glinka T.: Elektronizacja taboru tramwajowego. Materiały V Sympozjum na temat "Podstawowe problemy energoelektroniki " PTETiS, Gliwice 1993.
2. IGBT Designer's Manual. International Rectifiev 1991.
3. GTR Module application Notes. Toshiba 1991.

Praca finansowana jest przez Komitet Badań Naukowych, Umowa nr PB 330/9/91.

Recenzent: Prof.dr hab. Teresa Orłowska-Kowalska

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 1994

Abstract

The secondary d.c. circuit of 105 N tramway are supplied from PT44/10, motor - generator set. The motor-generator set propels the cooling fans and supplies the tramway secondary circuits and battery-charging circuits. The transistor converter should be able to fulfil the same functions. The converter consists of:

1. DC/DC converter, used for lowering the voltage from 600 to 40 and 24 V (fig.1)
2. DC/AC inverter, converting 600 V d.c. voltage into three-phase a.c. voltage of 380 V (fig.5)
3. induction motor rating at 3.0 kW, 3 x 380 V, 60 Hz.

Both DC/DC converter and DC/AC inverter are built using IGBT transistors. DC/DC converter provides the separation of 600 V circuit from 40 V circuit. The functioning of DC/DC converter is explained in fig.2 and equations (1) to (4). Fig.3 shows the output

characteristics of the converter voltage (current) at different supply voltages. Fig.4 shows the time course of Vand U_{40} voltages during switching on an off of the converter. Fig.6 shows the output voltage and current of the inverter at two different switching frequencies. Table 1 gives the comparison of power losses and weights of PTa-44/10 motor - generator set and transistor converter.