Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Nr 66 Politechniki Wrocławskiej Nr 66

Studia i Materiały Nr 32 2012

maszyny z magnesami trwałymi

Robert ROSSA*, Tomasz WOLNIK*

OBLICZENIA CHARAKTERYSTYK OBCIĄŻENIA PRĄDNIC SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – PORÓWNANIE WYNIKÓW SZYBKIEJ METODY POLOWO-OBWODOWEJ Z WYNIKAMI ANALIZY MES DLA STANÓW PRZEJŚCIOWYCH

W artykule przedstawiono w skrócie szybką metodę polowo-obwodową obliczania charakterystyk obciążenia prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, pracujących samotnie przy stałej prędkości obrotowej na odbiorniki liniowe o charakterze R lub RL. Obliczenia polowe są w tej metodzie realizowane z wykorzystaniem stałoprądowej analizy MES 2D rozkładu pola w prądnicy, specyficznego dla danych parametrów obciążenia (moc wydawana i $\cos\varphi$ obciążenia). Następnie zaprezentowano wybrane charakterystyki obciążenia modelowej prądnicy synchronicznej $2p = 18$ o konstrukcji z magnesami wewnątrz pakietowanego rdzenia wirnika, obliczone z wykorzystaniem opracowanego algorytmu i programu. Charakterystyki te porównano z charakterystykami obliczonymi dla tej samej prądnicy z zastosowaniem tzw. analizy MES dla stanów przejściowych wykorzystującej złożony model matematyczny prądnicy. Porównanie charakterystyk obciążenia obliczonych obiema metodami wskazuje, że opracowana szybka metoda polowo-obwodowa daje bardzo zbliżone wyniki, przy znacząco mniejszych wymaganiach dotyczących wydajności obliczeniowej sprzętu komputerowego.

1. WSTĘP

Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi przeznaczone do odnawialnych źródeł energii o mocach do ok. 100 kW, pracują często jako prądnice samotne zasilające odbiorniki liniowe typu R (grzejniki). Kształty charakterystyk obciążenia tych prądnic (charakterystyki zewnętrzne), a więc także uzyskiwana moc i sprawność, zależą w głównej mierze od konstrukcji ich wirnika. Dla konstrukcji z magnesami mocowanymi na powierzchni wirnika (ang. *Surface Mounted PMSG*, *SMPMSG*) charakterystyki obciążenia $U = f(P_2)$ prądnic pracujących na obciążenie R lub RL są zawsze opadające

* Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”, al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice, r.rossa@komel.katowice.pl, t.wolnik@komel.katowice.pl

(zmniejszenie napięcia przy wzroście mocy wydawanej). Dla konstrukcji z magnesami mocowanymi wewnątrz wirnika (ang. *Interior PMSG*, *IPMSG*), w przypadku których pomiędzy reaktancjami magnesującymi w osi podłużnej i poprzecznej zachodzi zależność: $X_{md} < X_{mq}$, charakterystyki obciążenia $U = f(P_2)$ mają korzystniejszy kształt, tzn. w pewnym, nawet szerokim zakresie mocy wydawanych, charakterystyki te mogą być bliskie płaskim lub wznoszące.

W celu umożliwienia szybkiego projektowania prądnic z magnesami trwałymi dedykowanych do pracy samotnej w odnawialnych źródłach energii o mocy do ok. 100 kW, opracowano algorytm obliczeniowy i zaimplementowano go w programie do szybkich, zautomatyzowanych obliczeń charakterystyk obciążenia metodą polowo-obwodową, z obliczeniami polowymi realizowanymi z wykorzystaniem analizy stałoprądowej MES 2D. Szybki algorytm obliczeniowy omówiono w kolejnym punkcie artykułu, a następnie uzyskane przy jego pomocy wyniki obliczeń charakterystyk obciążenia dla wybranej prądnicy modelowej zweryfikowano poprzez ich porównanie z wynikami uzyskanymi przy pomocy analizy MES dla stanów przejściowych bazującej na bardzo dokładnym modelu matematycznym tej samej prądnicy.

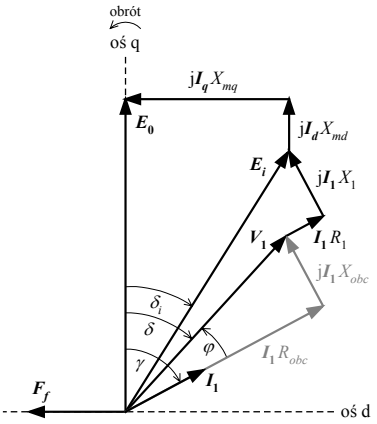
2. SZYBKI ALGORYTM OBLICZANIA CHARAKTERYSTYK OBCIĄŻENIA PRĄDNIC PRACUJĄCYCH SAMOTNIE NA ODBIORNIK R LUB RL

Szybki algorytm obliczania charakterystyk obciążenia prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi pracujących samotnie na liniowe odbiorniki R lub RL oparto na odpowiednio zaadoptowanej tzw. metodzie polowo-obwodowej obciążeniowej. Charakterystyki obciążenia są w tym algorytmie obliczane w oparciu o klasyczne równania maszyny synchronicznej, wynikające z jej wykresu wskazowego dla układu współrzędnych *d*–*q*–0 (rys. 1).

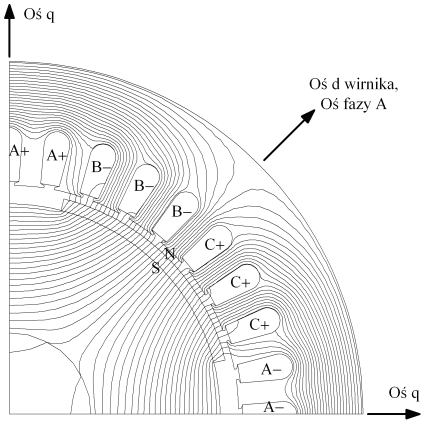
Parametry skupione wykresu wskazowego mające zasadniczy wpływ na charakterystyki obciążenia maszyny: reaktancje magnesujące X_{md}, X_{mq} oraz napięcie E_0 indukowane w fazie uzwojenia twornika przez wirujące magnesy, obliczane są oddzielnie dla każdego z analizowanych punktów pracy prądnicy z wykorzystaniem stałoprądowej analizy MES 2D rozkładu strumienia magnetycznego w maszynie. Przy obliczaniu w/w parametrów skupionych uwzględniana jest ich zależność od aktualnego poziomu nasycenia w rdzeniu magnetycznym maszyny, który zależy z kolei od aktualnego obciążenia (punktu pracy) maszyny synchronicznej.

Idea szybkiego algorytmu obliczeniowego (rys. 3) opiera się na możliwości obliczenia oddzielnie dla każdego punktu pracy prądnicy, przy wykorzystaniu odpowiednio przygotowanego modelu 2D MES prądnicy (rys. 2) z właściwie zdefiniowanymi wymuszeniami prądowymi (innymi dla każdego punktu pracy), następujących wielkości występujących na wykresie wskazowym:

- modułu Φ wektora wypadkowego strumienia głównego $\boldsymbol{\Phi}$ w szczelinie powietrznej;
- modułu E_i wskazu napięcia szczelinowego $\boldsymbol{E}_\mathbf{i}$;
- kąta fazowego δ_i wskazu $\boldsymbol{E}_i$.



Rys. 1. Wykres wskazowy prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do analizy pracy samotnej na odbiornik R lub RL
Fig. 1. Phasor diagram of PMSG connected to R or R–L type load

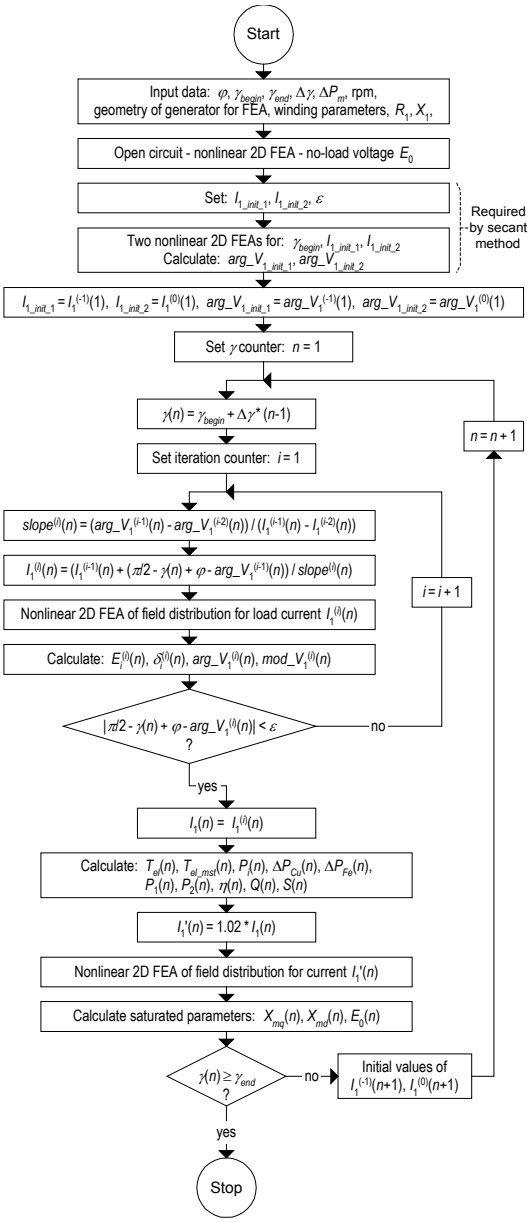


Rys. 2. Model MES prądnicy SMPMSG. Oś fazy A uzwojenia pokrywa się z osią d wirnika. Model obejmuje jeden biegun generatora. Rozkład strumienia magnetycznego odpowiada pracy na biegu jałowym
Fig. 2. 2D FEA model of SMPMSG. A-phase axis of winding is aligned with d-axis of rotor. Model covers only one pole pitch of generator. Field distribution for no-load condition is shown

Powyższe wielkości obliczane są dla każdego punktu pracy z uwzględnieniem specyficznego dla tego punktu rozkładu pola elektromagnetycznego w prądnicy. Dla ustalonego z góry współczynnika mocy odbiornika $\cos\varphi$, punkt pracy określony jest przez wartości modułu I_1 i kąta fazowego γ wskazu prądu obciążenia $\boldsymbol{I}_\mathbf{1}$ (rys. 2), które to wielkości przeliczane są odpowiednio na prądy fazowe w uzwojeniu twornika i zadawane w modelu 2D MES prądnicy.

W algorytmie obliczeniowym (rys. 3) założono, że wielkościami zadawanymi przy poszukiwaniu rozwiązania równań wynikających z wykresu wskazowego prądnicy pracującej samotnie na odbiornik R lub RL są:

- zakres kątów fazowych $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$ wskazu prądu $\boldsymbol{I}_\mathbf{1}$, odpowiadający pełnemu zakresowi prądów obciążenia prądnicy;
- współczynnik mocy obciążenia $\cos\varphi$, stały w całym zakresie prądów obciążenia.



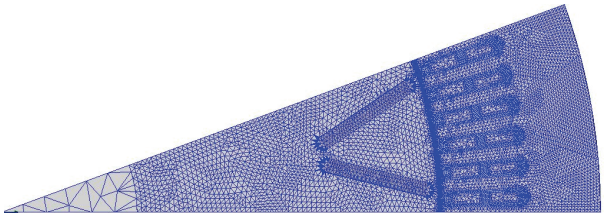
Rys. 3. Algorytm obliczania charakterystyk obciążenia prądnic pracujących samotnie na odbiorniki typu R, RL. Górne indeksy ^{i} oznaczają kolejne iteracje prądowe metodą siecznych, n oznacza kolejne wartości kąta γ z zakresu $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$

Fig. 3. Algorithm for computation of load characteristics of stand-alone PMSGs. Upper indexes ^{i} denote the successive number of iteration by secant method, n denotes the successive number of phase angle γ taken from the range $\gamma_{begin} \div \gamma_{end}$

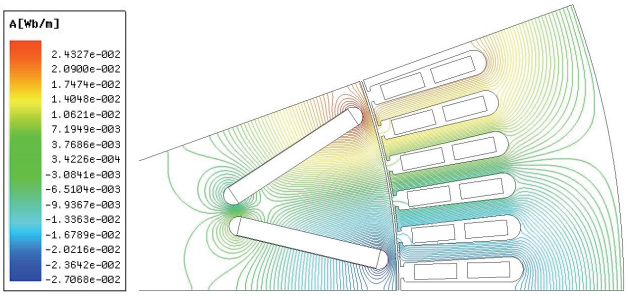
W algorytmie założono także, że wszystkie zależności matematyczne opisujące pracę samotną prądnicy na odbiornik R lub RL są, dla zadanych γ i $\cos\varphi$, spełnione jednocześnie tylko przez jedną wartość modułu I_1 prądu fazowego, tzn. wzrostowi kąta γ odpowiada wzrost modułu I_1. Właściwa wartość modułu I_1 nie jest początkowo znana i jest znajdowana iteracyjnie, tzw. metodą siecznych.

3. WERYFIKACJA ALGORYTMU OBLICZENIOWEGO Z WYKORZYSTANIEM ZŁOŻONEGO MODELU MATEMATYCZNEGO DO ANALIZY MES DLA STANÓW PRZEJŚCIOWYCH

Poprawność algorytmu z rys. 3 zweryfikowano przez porównanie obliczonych z jego pomocą charakterystyk obciążenia wybranej prądnicy modelowej z tymi samymi charakterystykami obliczonymi z wykorzystaniem złożonej analizy MES 2D dla stanów przejściowych.



Rys. 4. Model obwodu elektromagnetycznego prądnicy IPMSG (przekrój poprzeczny bieguna)
Fig. 4. Model of electromagnetic circuit of IPMSG (cross section of one magnetic pole)



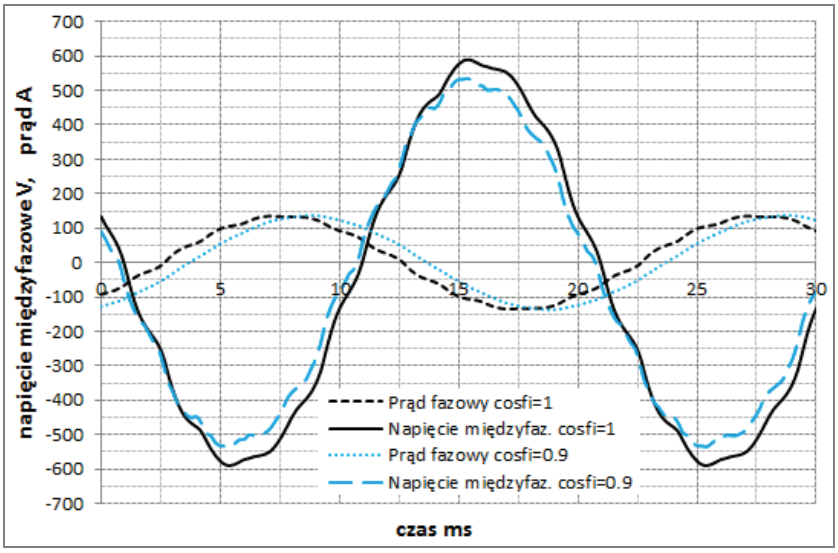
Rys. 5. Linie ekwipotencjalne potencjału magnetycznego w IPMSG dla pracy na biegu jałowym, wynik z analizy MES dla stanów przejściowych
Fig. 5. Equipotential lines of magnetic vector potential distribution in a model of IPMSG at no-load, obtained from one of the transient 2D FEA

Obliczenia obiema metodami przeprowadzono dla modelowej prądnicy o konstrukcji IPMSG, wzniosie osi wału H = 355 mm, liczbie biegunów $2p$ = 18, prędkości

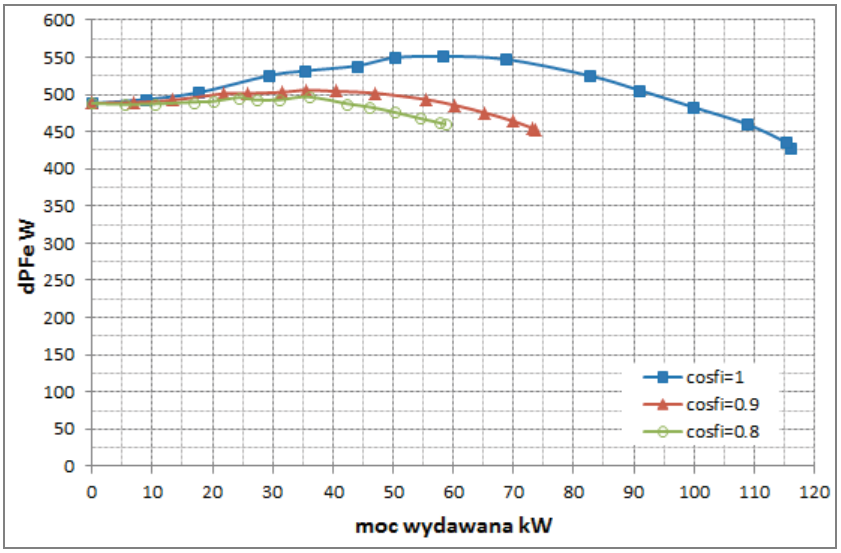
znamionowej n_N = 333,3 min^{-1}, mocy znamionowej P_N = 75 kW. Jest to prądnica z magnesami trwałymi każdego bieguna magnetycznego wirnika ułożonymi w kształcie litery „V".

Obliczenia charakterystyk obciążenia z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych przeprowadzono na modelu prądnicy obejmującym jeden biegun magnetyczny.

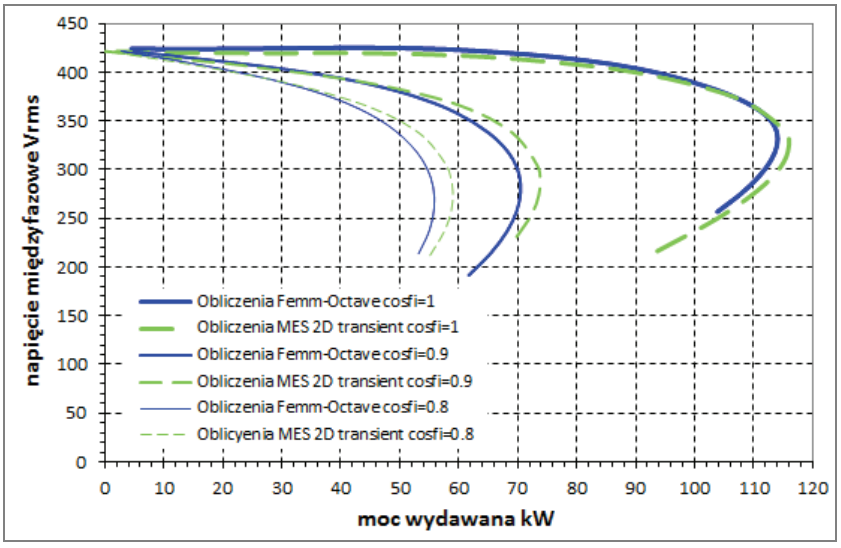
Weryfikacyjne obliczenia charakterystyk obciążenia przeprowadzono dla trzech wartości współczynników mocy obciążenia, cosφ = 0,8, 0,9 oraz 1. Wartość oraz charakter obciążenia prądnicy zadawany był w modelu MES 2D dla stanów przejściowych parametrycznie, poprzez krokową zmianę rezystancji obciążenia i odpowiednią zmianę indukcyjności obciążenia, tak by utrzymać każdorazowo zadaną wartość cosφ. Po obliczeniu kilku okresów przebiegów czasowych napięć na zaciskach prądnicy, prądów fazowych oraz momentu elektromagnetycznego, obliczane były następnie pozostałe parametry prądnicy: moc mechaniczna na wale P_1, moc czynna wydawana P_2, sprawność η. Model matematyczny do analizy MES dla stanów przejściowych umożliwiał bezpośrednie obliczanie strat w pakiecie blach prądnicy w każdym kroku czasowym. Do określenia charakterystyk obciążenia prądnicy obliczane były wartości uśrednione za okres elektryczny momentu elektromagnetycznego T_e i strat w pakiecie blach ΔP_{Fe} oraz wartości skuteczne prądów fazowych i napięć na zaciskach.



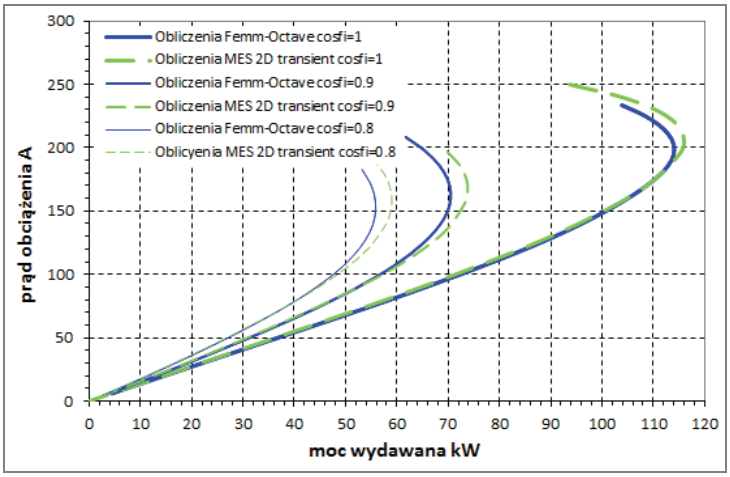
Rys. 6. Obliczone przebiegi czasowe wybranych prądów fazowych oraz napięć międzyfazowych na zaciskach prądnicy dla cosφ = 0,9 i 1
Fig. 6. Calculated waveforms of phase currents and line-line voltages at generator terminals assuming load power factors cosφ = 0.9 and 1



Rys. 7. Straty w rdzeniu prądnicy ΔP_{Fe} w zależności od mocy wydawanej, otrzymane z analiz MES dla stanów przejściowych przy różnych cosφ
Fig. 7. Core loss ΔP_{Fe} in generator vs. output power, obtained from transient 2D FEA



Rys. 8. Obliczone charakterystyki $U = f(P_2)$, porównanie wyników dwóch metod obliczeniowych
Fig. 8. Calculated characteristics $U = f(P_2)$, comparison of results obtained by two methods



Rys. 9. Obliczone charakterystyki $I_1 = f(P_2)$, porównanie wyników dwóch metod obliczeniowych
Fig. 9. Calculated characteristics $I_1 = f(P_2)$, comparison of results obtained by two methods

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione na rys. 8 i 9 porównanie charakterystyk obciążenia $U = f(P_2)$ oraz $I_1 = f(P_2)$ modelowego generatora IPMSG pracującego samotnie na odbiornik R lub RL, obliczonych opracowaną metodą polowo-obwodową oraz z wykorzystaniem analizy MES dla stanów przejściowych, wykazuje bardzo dobrą zgodność wyników obu metod dla szerokiego zakresu obciążeń mocą P_2. Jedynie przy obciążeniach bliskich mocy maksymalnej P_2 dla danego $\cos\varphi$ uwidaczniają się różnice wyników obliczeń. Obliczone różnice mocy maksymalnych P_2 przy różnych $\cos\varphi$ nie przekraczają 5,5%. Przyczyny tych różnic będą przedmiotem dalszych prac nad opracowanym algorytmem polowo-obwodowym. Zaletą tego algorytmu jest krótki czas obliczeń charakterystyk obciążenia, który dla jednej wartości $\cos\varphi$ nie przekracza 15 min, natomiast obliczenie tych samych charakterystyk za pomocą analizy MES dla stanów przejściowych zajmowało ok. 8 godz. (analizowano tą samą liczbę punktów na charakterystykach, dla każdego punktu obliczano dwa okresy elektryczne przebiegów czasowych).

CALCULATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF PMSG – COMPARISON OF RESULTS OBTAINED BY FIELD-CIRCUIT METHOD AND 2D TRANSIENT FEA

This paper presents the field-circuit method for quick computation of load characteristics of stand-alone with a constant speed permanent magnet synchronous generators (PMSGs) with R or RL type load. In article presented selected load characteristics of IPM synchronous generator with $2p = 18$, calculated using developed algorithm and program. Results obtained with both methods are convergent.