

ODDZIAŁYWANIE PRZEKSZTAŁNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH DUŻEJ MOCY NA JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Jarosław ŁUSZCZ

1. Politechnika Gdańska

tel: +48 58 347 25 34, fax: +48 58 341 08 80, e-mail: j.luszcz@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono zagadnienia związane z oddziaływaniem układów przekształtnikowych AC/DC na sieć zasilającą poprzez generowanie prądów odkształconych. Przedstawione wyniki badań porównawczych emisji zaburzeń przewodzonych układów prostownikowych klasycznych (diodowych) oraz nowoczesnych (tranzystorowych) wykazują znaczne zwiększenie emisji w zakresie stosowanych częstotliwości modulacji w typowych aplikacjach przemysłowych. Przedstawione zagadnienia zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości są obecnie coraz częstszą przyczyną zakłóceń w systemach sterowania i w związku z tym także przedmiotem prac normalizacyjnych, których celem jest określenie nowych wymagań technicznych dla urządzeń umożliwiających skuteczniejsze zachowanie kompatybilności elektromagnetycznej.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, zniekształcenia harmoniczne napięć i prądów, zaburzenia elektromagnetyczne przewodzone małej częstotliwości.

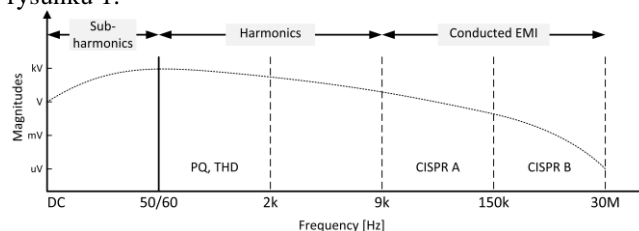
1. WPROWADZENIE

Współczesne przekształtniki energoelektroniczne eksploatowane w sieciach elektroenergetycznych nN i SN osiągają często moce znamionowe nawet kilkunastu MW. Z punktu widzenia sieci zasilającej, większość z nich to przekształtniki prądu przemiennego na prąd stały (AC/DC), ponieważ przetwarzanie AC/AC zazwyczaj uzyskuje się poprzez obwód pośredniczący prądu stałego. Przy tak dużych przetwarzanych mocach stosowanie rozwiązań diodowych i tyrystorowych jest coraz częściej nieakceptowane z powodu wielu ograniczeń technicznych oraz przede wszystkim ze względu na negatywne oddziaływanie na jakość energii w sieci zasilającej poprzez generowanie zniekształceń harmonicznym [1 - 5].

Nowoczesne rozwiązania przekształtników AC/DC pozwalających na znacznie efektywniejszą współpracę z siecią elektroenergetyczną wykorzystują rozwiązania z zastosowaniem tranzystorowych kluczy przełączających w pełni sterowanych z wykorzystaniem różnych algorytmów modulacji, najczęściej PWM. Zastosowanie tej technologii pozwala na elastyczne sterowanie przepływem mocy czynnej i biernej w obu kierunkach, co znacznie rozszerza obszar możliwych zastosowań w wielu różnorodnych aplikacjach jak np. kompensatory mocy biernej, filtry aktywne, przekształtnikowe układy napędowe, energetyka wiatrowa i solarna, systemy przesyłowe DC, integracja

różnych sieci zasilających, systemy zasilania bezprzewodowego (UPS) [4 - 10].

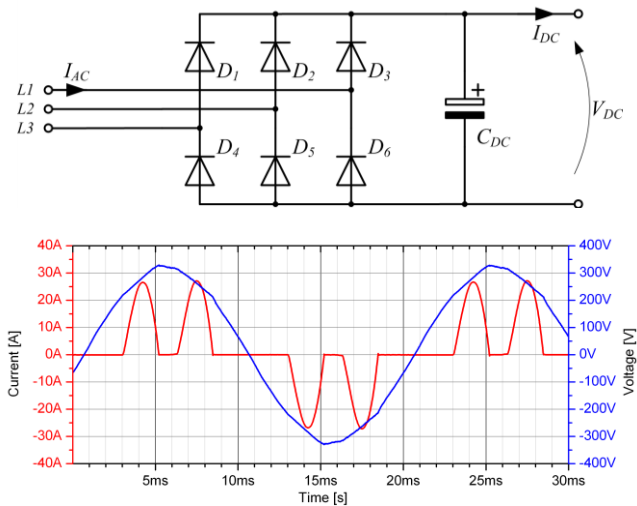
Przekształtniki AC/DC z modulacją PWM pozwalają również na znaczne ograniczenie emisji składowych harmonicznym pobieranych prądów w stosunku do rozwiązań diodowych i tyrystorowych w zakresie częstotliwości do 2 kHz tj do harmonicznym rzędu 40. Stosowane częstotliwości nośne modulacji zazwyczaj w zakresie od pojedynczych kiloherców w przekształtnikach dużych mocy do nawet kilkudziesięciu kiloherców w przekształtnikach mniejszych mocy powodują jednak znaczne zwiększenie emisji zaburzeń przewodzonych w szczególności w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 150 kHz. W zakresie częstotliwości powyżej 9 kHz problem dopuszczalnych emisji zaburzeń jest już dość szczegółowo sprecyzowany przez wymagania normalizacyjne kompatybilności elektromagnetycznej [11-13]. Natomiast w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 9 kHz problem zwiększonej emisji prowadzi do coraz częstszego zakłócania systemów sterowania ze względu na znacznie rosnącą liczbę stosowanych przekształtników AC/DC z modulacją PWM. Ten zakres częstotliwości do niedawna nie był przedmiotem wymagań normalizacyjnych zarówno jakości energii (PQ) jak i kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Obecnie prowadzone są intensywne prace normalizacyjne, których celem jest opracowanie zasad ułatwiających zachowanie kompatybilnej współpracy urządzeń w warunkach występowania zaburzeń przewodzonych w zakresie częstotliwości mniejszych niż 9 kHz. Zakres ten jest najczęściej kojarzony z zganieniami nazywanymi jako „kompatybilność elektromagnetyczna w zakresie małych częstotliwości” (*Low Frequency EMC*). Charakterystyczne zakresy częstotliwości stosowane w normalizacji dotyczącej emisji zaburzeń przewodzonych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Podział widma częstotliwości zaburzeń przewodzonych według wymagań normalizacyjnych dotyczących jakości energii elektrycznej oraz kompatybilności elektromagnetycznej

2. ZNIEKSZTAŁCENIA HARMONICZNE PRĄDÓW POBIERANYCH PRZEZ PROSTOWNIKI DIODOWE

Prostowniki diodowe, a w szczególności zawierające znaczną pojemność wygładzającą w obwodzie prądu stałego są źródłem znacznych zniekształceń harmoniczných prądu pobieranego z sieci zasilającej. Na rysunku 2. przedstawiono schemat klasycznego trójfazowego układu prostownikowego wraz z przykładowymi przebiegami prądów wejściowych.



Rys. 2. Klasyczny trójfazowy 6 pulsowy prostownik diodowy oraz typowo odkształcony przebieg prądu wejściowego pobieranego z sieci zasilającej

Wartości szczytowe prądów występujących w takim układzie prostownikowym są nawet kilkakrotnie większe niż te wynikające z pobieranej przez układ mocy. Maksymalne wartości prądów zależą przede wszystkim od pojemności C_{DC} oraz impedancji sieci zasilającej. Poziom zniekształceń harmoniczných prądów związany jest głównie ze współczynnikiem szczytu prądu pobieranego definiowanym, jako stosunek wartości maksymalnej prądu do wartości skutecznej.

Powszechnie stosowaną miarą ilości zniekształceń harmoniczných jest procentowy współczynnik zawartości składowych harmoniczných prądu THD_I określany zgodnie z zależnością (1), gdzie każda składowa harmoniczna I_n jest określana w oparciu o wyniki dyskretnego analizy Fouriera I_i dla 200 ms (10 okresowych) przedziałów czasowych wg zależności (2) [13].

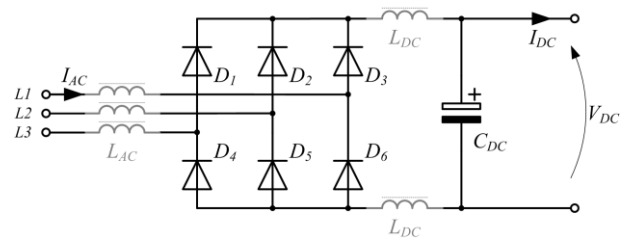
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} I_n^2}}{I_1} \dots \dots \dots (1)$$

$$I_n = \sqrt{\frac{I_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=k-4}^{k+4} I_i^2 + \frac{I_{k+5}^2}{2}} (2)$$

Współczynnik THD_I w prądzie pobieranym z sieci zasilającej w typowych układach prostownikowych z pojemnością C_{DC} w zależności od impedancji sieci zasilającej często osiąga wartości nawet kilkudziesięciu procent, co powoduje przekroczenie limitów określanych przez normy dla poszczególnych grup urządzeń.

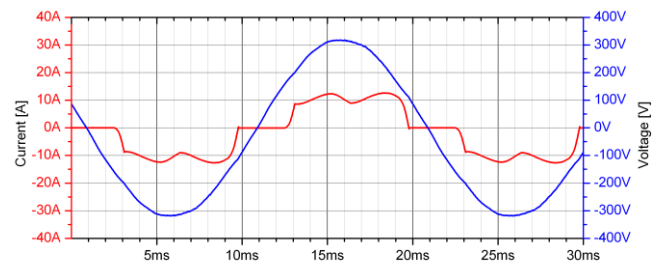
Powszechnie stosowane ograniczanie emisji harmoniczných prądu w układach prostownikowych polega na stosowaniu tzw. filtrów pasywnych tj. indukcyjności po

stronie prądu przemiennego L_{AC} zwiększających impedancję źródła zasilania oraz indukcyjności L_{DC} włączanych w obwodzie prądu stałego przed pojemnością C_{DC} , aby zwiększyć impedancję tej części obwodu dla składowych zmiennych (rys. 3).

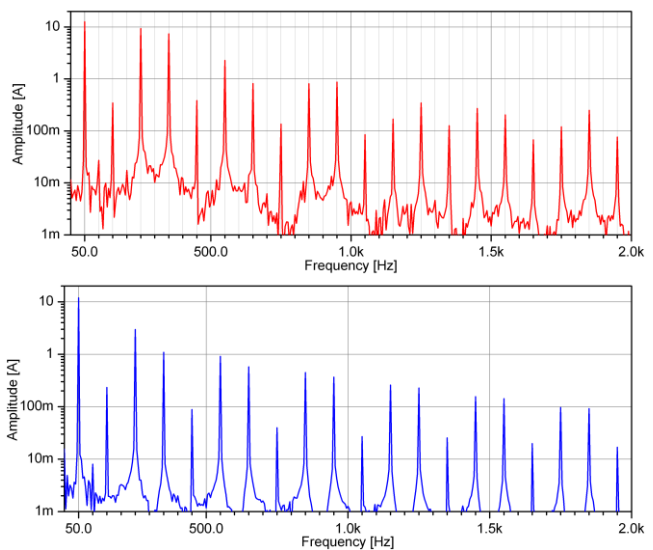


Rys. 3. Klasyczny trójfazowy prostownik diodowy z elementami pasywnej filtracji prądów wejściowych

Przebieg prądu wejściowego prostownika z zastosowaną filtracją pasywną (rys. 4) charakteryzuje się znacznie mniejszym współczynnikiem szczytu, co również skutkuje obniżeniem współczynnika zawartości składowych harmoniczných. Porównanie widm harmoniczných prądów wejściowych określonych zgodnie z wymaganiami normy [13] dla badanego prostownika bez filtracji oraz z filtracją pasywną (indukcyjności L_{AC} oraz L_{DC}) przedstawiono na rysunku 5. Obliczenia przeprowadzone dla przedstawionych przykładów wykazały zmniejszenie współczynnika zniekształceń harmoniczných THD_I poprzez zastosowanie filtracji pasywnej z 97% do 29%.



Rys. 4. Przebieg prądu wejściowego w układzie prostownika diodowego z zastosowanymi elementami filtracji pasywnej w obwodzie prądu przemiennego i stałego

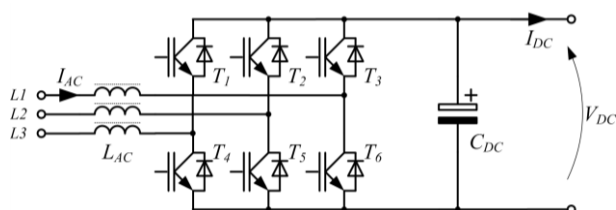


Rys. 5. Porównanie widm składowych harmoniczných prądu wejściowego prostownika 6 pulsowego z obciążeniem pojemnościowym: bez filtracji (wykres górny) oraz z filtracją pasywną (wykres dolny)

Z przedstawionych charakterystyk widmowych prądów wejściowych (rys. 5) można wnioskować, że efekt ten uzyskuje się głównie poprzez obniżenie wartości największych harmonicznycych najniższych rzędów, czyli dla prostownika 6 plusowego H5, H7 oraz H11, H13. Wartości pozostałych harmonicznycych wyższych rzędów, przy zastosowaniu filtracji pasywnej zmieniają się w mniejszym stopniu. Dalsze zwiększanie poziomu filtracji jest znacznie mniej efektywne, co w praktyce oznacza niewspółmierny wzrost kosztów oraz wskaźników stosunku mocy do masy i objętości.

3. ZNIEKSZTAŁCENIA HARMONICZNE PRĄDÓW POBIERANYCH PRZEZ PRZEKSZTAŁTLNIKI AC/DC Z MODULACJĄ PWM

Współczesne przekształtniki AC/DC z modulacją PWM wykorzystują elementy w pełni sterowane (tranzystory IGBT), co pozwala na sterowanie pracą układu mostkowego w pełnym zakresie pracy cztero-kwadrantowej. Typowa konfiguracja układu przedstawiona na rysunku 6. zawiera również indukcyjny filtr wejściowy niezbędny do uzyskania poprawnej współpracy przekształtnika z siecią zasilającą.

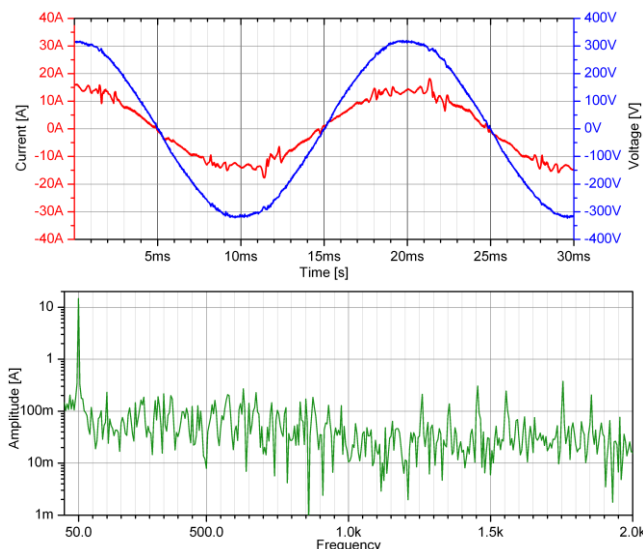


Rys. 6. Typowa konfiguracja tranzystorowego przekształtnika AC/DC z indukcyjnym filtrem wejściowym

Filtr ten w przekształtnikach AC/DC z modulacją PWM jest dobierany na pasmo częstotliwości zbliżone do częstotliwości nośnej modulacji, czyli znacznie większych niż częstotliwości harmonicznycych niskich rzędów, co pozwala na znaczne zredukowanie masy i wymiarów, a także kosztów. Możliwe jest uzyskanie dalszej optymalizacji konstrukcji filtrów, wymaga to jednak zastosowania bardziej złożonych struktur filtru np. LCL, ale pozwala na dalsze zmniejszanie kosztów.

3.1. Emisja składowych harmonicznycych prądów w zakresie częstotliwości do 2 kHz

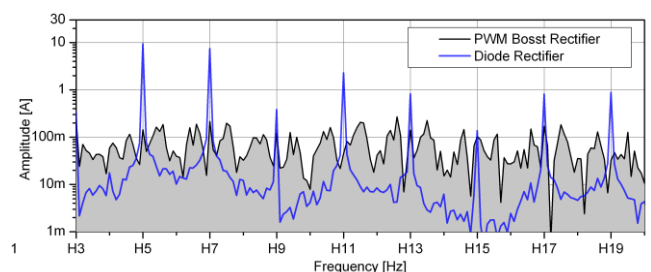
Zastosowanie w przekształtnikach AC/DC modulacji PWM wraz z odpowiednio dobranym filtrem wejściowym pozwala na ograniczenie emisji składowych harmonicznycych prądów wejściowych THD_I w zakresie częstotliwości do 2 kHz do poziomu kilku procent. Jest to poziom akceptowalny przez wymagania norm i porównywalny z występującymi poziomami zniekształceń napięcia w typowych sieciach publicznych. Przebieg prądu wejściowego oraz jego charakterystyka widmowa przedstawione na rysunku 7. potwierdzają zmniejszenie zniekształceń harmonicznycych niskich rzędów oraz przesunięcia fazowego. Pokazują one również występowanie odkształceń znacznie wyższych częstotliwości niezwiązanych z częstotliwością sieci zasilającej.



Rys. 7. Przebieg oraz widmo prądu wejściowego przekształtnika AC/DC z modulacją PWM

3.2. Emisja zniekształceń interharmonicznycych prądów w przekształtnikach AC/DC z modulacją PWM

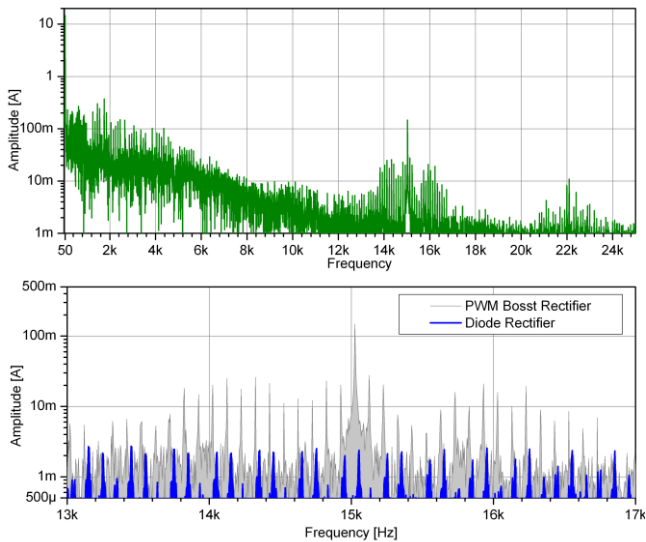
Niepożądanym efektem ubocznym ograniczania składowych harmonicznycych niskich rzędów, pochodnych częstotliwości sieciowej, jest znaczne zwiększenie, z kilku do kilkunastu procent zniekształceń interharmonicznycych, których częstotliwości nie są całkowitą wielokrotnością częstotliwości sieciowej. Powoduje to niestety zwiększenie wypadkowej gęstości widmowej wytwarzanych zaburzeń przewodzonych, przy jednoczesnym obniżeniu harmonicznycych o częstotliwościach sieciowych (rys. 8).



Rys. 8. Porównanie widm zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości prądu wejściowego przekształtnika diodowego oraz tranzystorowego

3.3. Emisja składowych harmonicznycych prądów w zakresie częstotliwości modulacji PWM

Modulacja PWM powoduje generowanie zniekształceń harmonicznycych prądów wynikających z częstotliwości nośnej, które pomimo stosowania filtracji przenikają do sieci zasilającej. Poziomy amplitud tych zaburzeń są stosunkowo niewielkie, jednak przy znacznych częstotliwościach modulacji ich potencjał zakłócający jest istotny i mogą być przyczyną niewłaściwego działania innych urządzeń. Przykładową charakterystykę widmową zaburzeń przewodzonych przekształtnika PWM z częstotliwością nośną modulacji 15 kHz pokazano na rysunku 9., gdzie widoczny jest wyraźny wzrost emisji w paśmie częstotliwości modulacji.



Rys. 9. Zwiększony poziom emisji zaburzeń przewodzonych w paśmie częstotliwości nośnej modulacji PWM

4. WNIOSKI

Tranzystorowe układy przekształtnikowe AC/DC z modulacją PWM pozwalają na skuteczne obniżanie składowych harmonicznich prądów pobieranych z sieci zasilającej w zakresie częstotliwości typowych analiz jakości energii tj. do 2kHz. Skutkiem ubocznym tej technologii są trudne do wyeliminowania efekty: zwiększone poziomy emisji zniekształceń interharmonicznich oraz zwiększonej emisji zaburzeń przewodzonych w pasmach częstotliwości skorelowanych z modulacją PWM. Powoduje to konieczność stosowania specjalizowanych układów filtracji zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości do 150kHz.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Cichowlas, M., Malinowski, M., Kazmierkowski, M., Sobczuk, D., Rodriguez, P. & Pou, J. [2005]. Active filtering function of three-phase PWM boost rectifier under different line voltage conditions, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 52(2): 410 – 419.
2. Olofsson, M. [2009]. Power quality and EMC in smart grid, *Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on*, pp. 1 –6.

3. Liserre, M., Dell'Aquila, A. & Blaabjerg, F. [2003]. An overview of three-phase voltage source active rectifiers interfacing the utility, *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Vol. 3*, p. 8 pp. Vol.3.
4. Benysek, G., Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy using Power Electronics Systems, *Power Systems, Springer-Verlag 2007*.
5. Smolenski, R., *Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids, Power Systems, Springer 2012*.
6. Bollen, M., Yang, Y. & Hassan, F., Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach, *Harmonics and Quality of Power. 13th International Conference ICHQP 2008*.
7. Smolenski, R., Selected conducted electromagnetic interference issues in distributed power systems, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences Vol. 57(no 4): pp.383–393*.
8. Strauss, P., Degner, T., Heckmann, W., Wasiak, I., Gburczyk, P., Hanzelka, Z., Hatziargyriou, N., Romanos, T., Zountouridou, E. & Dimeas, A. [2009]. International white book on the grid integration of static converters, *Electrical Power Quality and Utilisation. 10th International Conference EPQU 2009*.
9. Strzelecki, R. & Benysek, G. [2008]. Power electronics in smart electrical energy networks, *Power Systems, Springer-Verlag 2008*.
10. Wasiak, I. & Hanzelka, Z. [2009]. Integration of distributed energy sources with electric al power grid, Vol. 57, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, pp. 297–309.
11. IEC 61000-3-4 Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A.
12. IEC 61000-3-6 Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.
13. PN-EN 61000-4-7:2007 Metody badań i pomiarów - Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznich i interharmonicznich oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.

INFLUENCE OF HIGH-POWER ELECTRONIC CONVERTERS ON POWER QUALITY

Keywords: power quality, voltage and current harmonic distortion, low-frequency conducted disturbances

PWM boost AC-DC converters are increasingly used in contemporary application because of its considerable advantages, like bidirectional power transfer with unity power factor operation and low level of low order harmonic distortions emission. Systematic significant increase of the overall power quota converted from AC to DC and from DC to AC in the power system make these advantages more meaningful from the power quality point of view. This development trends also introduce some unfavourable effects, like increased conducted emission in higher frequency ranges. Increased harmonic emission in the frequency range between 2 kHz and 9 kHz as an effect of PWM method used for line current control in boost converters becomes a fundamental problem to solve in such converters connected directly to the power grid. In recent years increased number of investigations focused on arising compatibility challenges in frequency band 2 – 9 kHz has been reported and some new standardization methods has been initially proposed. Results of investigations presented in this paper demonstrate that line current and accompanying voltage ripples, as an effect of PWM modulation carrier frequency in PWM boost converters, can induce compatibility problems in numerous applications. These problems are usually difficult to solve by using conventional passive harmonic filters or radio frequency interference (RFI) filters. Harmonic emissions filtering in this frequency band require new specific types of filters to be used.