Ispravljači

Ispravljači su konvertori koji naizmeničnni napon ili struju pretvaraju u jednosmerni napon ili struju. Ovakvu konverziju mogu izvršiti jedino nelinearni sistemi. Prema vrsti ulazne i izlazne veličine (struja ili napon) moguće je razvrstati ispravljače na četiri grupe. Pri malim snagama najčešći su ispravljači sa naponskim ulazom i naponskim izlazom, dok pri većim snagama dominiraju ispravljači sa naponskim ulazom i strujnim izlazom. Prema sistemu napajanja, ispravljači mogu biti monofazni i trofazni. Takođe, izlazna veličina ispravljača može, a ne mora, biti regulisana. Kao i većina drugih klasifikacija, ova klasifikacija je relativna i pomaže samo u sistematizaciji izlaganja.

Za početak, posmatrajmo monofazni izvor napona

$$v_{IN} = V_m \sin(\omega_0 t + \theta)$$

amplitude V_m, efektivne vrednosti $V_{RMS} = V_m/\sqrt{2}$, kružne frekvencije ω_0, frekvencije $f_0 = \omega_0/(2\pi)$, periode $T_0 = 1/f_0 = 2\pi/\omega_0$, početne faze θ, kakav bi trebalo da bude mrežni napon. Posmatrani napon je neizobličen, pošto u spektru nema viših harmonika.

U cilju racionalnog prenosa snage, za elektroenergetski sistem je povoljno da struja svih potrošača bude sinusoidalnog oblika i u fazi sa naponom, dakle idealni potrošači su linearni stacionarni otpornici. Stoga je ulazna struja idealnog ispravljača

$$i_{IN} = I_m \sin(\omega_0 t + \theta)$$

gde je

$$R_E = \frac{V_m}{I_m}$$

otpornost emulirana na ulazu ispravljača. Ako ispravljač nema gubitaka, što je prirodna pretpostavka za idealni ispravljač, onda se srednja snaga preuzeta na ulazu

$$P_{IN} = \frac{1}{2}\, V_m\, I_m$$

predaje na izlazu, $P_{OUT} = P_{IN}$, odakle je

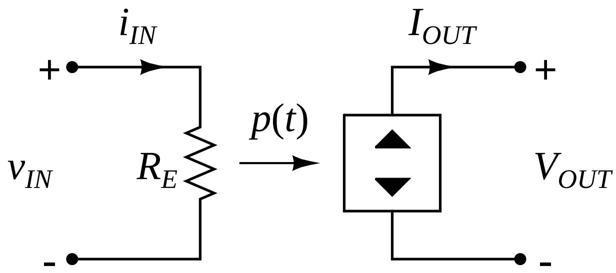
$$V_{OUT}\, I_{OUT} = \frac{1}{2}\, V_m\, I_m.$$

Dakle, idealni ispravljač na ulazu emulira otpornost, dok na izlazu predaje snagu preuzetu na ulazu. Svedeno na nivo trenutnih vrednosti struja i napona, model idealnog ispravljača se može predstaviti kao otpornik bez gubitaka, prikazan na slici 1. Ovakav model ima samo teorijsku vrednost, pošto su svi ispravljači koji kontrolišu oblik ulazne struje realizovani sa regulisanim izlazom, pa se emulirana otpornost podešava prema izlaznoj snazi. U slučaju ispravljača sa naponskim izlazom V_{OUT} kome potrošač uzima izlaznu struju I_{OUT} ovo uslovljava emuliranu otpornost

$$R_E = \frac{V_m^2}{2\, V_{OUT}\, I_{OUT}}.$$

U izrazu za emuliranu otpornost figuriše amplituda ulaznog napona V_m, koja se definiše za napon sinusoidalnog oblika, a određuje na osnovu posmatranja napona u intervalu vremena. Stoga nije moguće definisati opšti dvoportni element koji karakteriše regulisani idealni ispravljač za proizvoljni talasni oblik ulaznog napona na nivou trenutne vrednosti signala.

Najveći broj ispravljača na ulazu ne obezbeđuje sinusoidalni oblik struje u fazi sa naponom. Stoga je potrebno definisati parametre za karakterizaciju ovakvih ispravljača i njihovog



Slika 1: Idealni ispravljač.

odstupanja od idealnog potrošača, linearnog otpornika. Ulazna snaga ispravljača se definiše kao

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} p(t)\ dt = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} v_{IN}(t)\ i_{IN}(t)\ dt.$$

Prividna snaga na ulazu ispravljača je

$$S = V_{RMS}\ I_{RMS}$$

gde se efektivne vrednosti (*root-mean-square value, RMS value*) struje i napona određuju koristeći

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x^2(t)\ dt}.$$

Dominantni faktor u dimenzionisanju transformatora u elektroenergetskom sistemu je njihova prividna snaga, dok je dominantni faktor u dimenzionisanju površine poprečnog preseka kablova efektivna vrednost struje, sto se u uslovima specificiranog napona svodi na prividnu snagu. Zato ima smisla definisati faktor snage

$$PF = \frac{P}{S}$$

koji predstavlja meru racionalnog korišćenja resursa elektroenergetske mreže.

U slučaju da je ulazni napon neizobličen, ulazna snaga ispravljača je

$$P = V_{RMS}\ I_{1RMS}\ \cos\varphi_1$$

gde je I_{1RMS} efektivna vrednost osnovnog harmonika (fundamentalnog harmonika, fundamentala, harmonika na ω_0) ulazne struje, a φ_1 je fazna razlika između ulaznog napona i osnovnog harmonika ulazne struje ispravljača. U ovom slučaju se izraz za faktor snage svodi na

$$PF = \frac{I_{1RMS}}{I_{RMS}}\ \cos\varphi_1 = \frac{I_{1RMS}}{I_{RMS}}\ DPF$$

i zavisi od oblika ulazne struje (preko odnosa I_{1RMS}/I_{RMS}) i njenog položaja u odnosu na ulazni napon (preko φ_1). U cilju karakterisanja uticaja položaja ulazne struje u odnosu na ulazni napon, definiše se *displacement power factor* kao

$$DPF = \cos\varphi_1$$

dok je uticaj oblika karakterisan odnosom I_{1RMS}/I_{RMS}. Vrednost ovog odnosa je bliska 1 čak i za jako izobličene ulazne struje, pa se za karakterisanje oblika struje dodatno koristi ukupno harmonijsko izobličenje (*total harmonic distortion*) definisano kao

$$THD = THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kRMS}^2}}{I_{1RMS}}$$

ili kao

$$THD_2 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{kRMS}^2}}{I_{RMS}}.$$

Postojanje dve definicije za ukupno harmonijsko izobličenje je potencijalni izvor zabune, stoga ima smisla uvek naglasiti na koju definiciju se razmatranje odnosi. Definicija koja se danas smatra standardnom (prema standardu IEEE 519–1992) je THD_1, pa će se u ovom tekstu ona podrazumevati ako se drugačije ne naglasi.

Računanje vrednosti THD direktno prema definiciji je nepodesno, zbog računanja i sumiranja teorijski beskonačnog broja harmonika. U praksi je pogodnije koristiti Parsevalovu teoremu prema kojoj je

$$I_{RMS}^2 = \sum_{k=1}^{\infty} I_{kRMS}^2 = I_{1RMS}^2 + \sum_{k=2}^{\infty} I_{kRMS}^2$$

odakle se suma nepodesna za direktno izračunavanje indirektno određuje kao

$$\sum_{k=2}^{\infty} I_{kRMS}^2 = I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2.$$

Odavde je

$$THD_1 = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2}}{I_{1RMS}} = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2}{I_{1RMS}^2} - 1}$$

i

$$THD_2 = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2}}{I_{RMS}} = \sqrt{1 - \frac{I_{1RMS}^2}{I_{RMS}^2}}.$$

Vrednosti THD_1 i THD_2 su određene isključivo odnosom I_{1RMS}/I_{RMS}, pa se može uspostaviti međusobna veza THD_1 i THD_2 kao

$$THD_2 = \frac{THD_1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

i

$$THD_1 = \frac{THD_2}{\sqrt{1 - THD_2^2}}$$

što je prikazano na slici 2. U nekim situacijama od koristi može biti i odnos I_{1RMS}/I_{RMS} izražen preko THD_1 i THD_2

$$\frac{I_{1RMS}}{I_{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} = \sqrt{1 - THD_2^2}$$

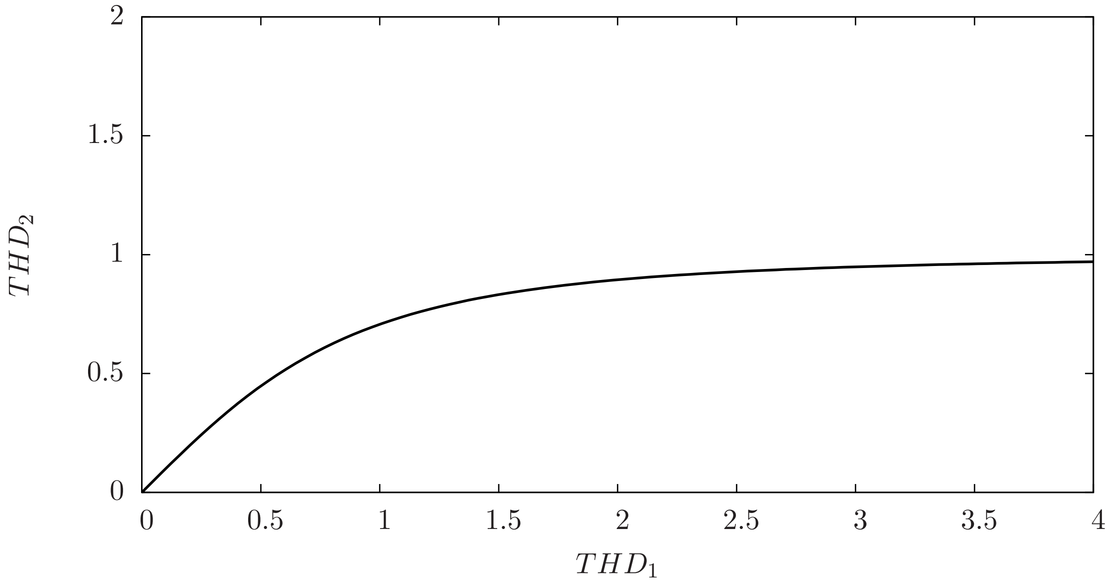
Kako je $0 \leq I_{1RMS}/I_{RMS} \leq 1$, važi $0 \leq THD_2 \leq 1$, dok za THD_1 nema gornjeg ograničenja. Valja napomenuti da se vrednosti za THD obično izražavaju u procentima.

Za određivanje THD potrebno je odrediti amplitudu osnovnog harmonika ulazne struje. Osim toga, punu informaciju o ulaznoj struji sadrži spektar ulazne struje, dok THD samo združeno analizira sve više harmonike, kroz zbir kvadrata njihovih amplituda. Signal $x(t)$ se može predstaviti razvojem u Furijeov red

$$x(t) = X_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(X_{Ck} \cos(k\omega_0 t) + X_{Sk} \sin(k\omega_0 t)\right)$$

gde je

$$X_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t)\, dt$$



Slika 2: Veza THD_1 i THD_2.

jednosmerna komponenta signala,

$$X_{Sk} = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) \; dt$$

je amplituda sinusne komponente k–tog harmonika, dok je

$$X_{Ck} = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) \; dt$$

amplituda kosinusne komponente k–tog harmonika. U posebnom slučaju određivanja amplitude osnovnog harmonika ulazne struje amplituda sinusne komponente je

$$I_{S1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{IN}(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) \; d(\omega_0 t)$$

amplituda kosinusne komponente je

$$I_{C1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_{IN}(\omega_0 t) \cos(\omega_0 t) \; d(\omega_0 t)$$

dok je amplituda osnovnog harmonika ulazne struje

$$I_{1m} = \sqrt{I_{S1}^2 + I_{C1}^2}$$

a njena efektivna vrednost

$$I_{1RMS} = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{I_{S1}^2 + I_{C1}^2}{2}}.$$

Navedeni parametri će biti korišćeni u karakterizaciji ispravljača koji će biti analizirani u daljem tekstu.