

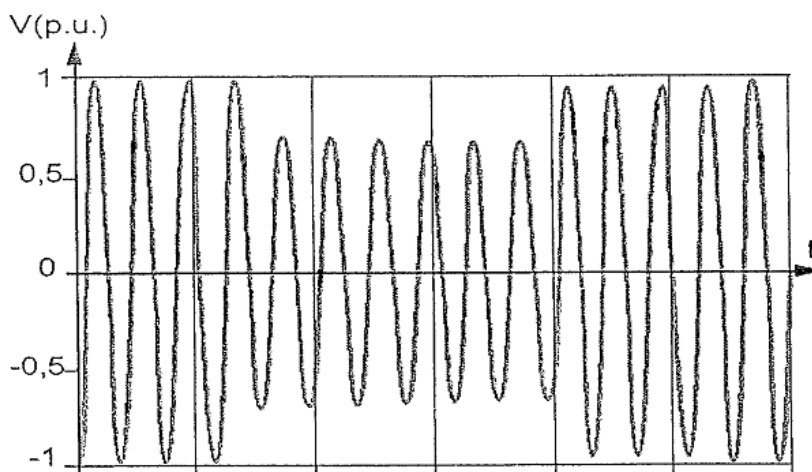
Laboratorijska vežba ima za cilj da demonstrira:

1. fenomen propada napona uzrokovan startovanjem asinhronog motora i uticaj krutosti mreže na propade napona;
2. uticaj harmonijskog izobličenja napona napajanja na rad asinhronog motora;
3. uticaj neuravnoteženosti napona napajanja na rad asinhronog motora.

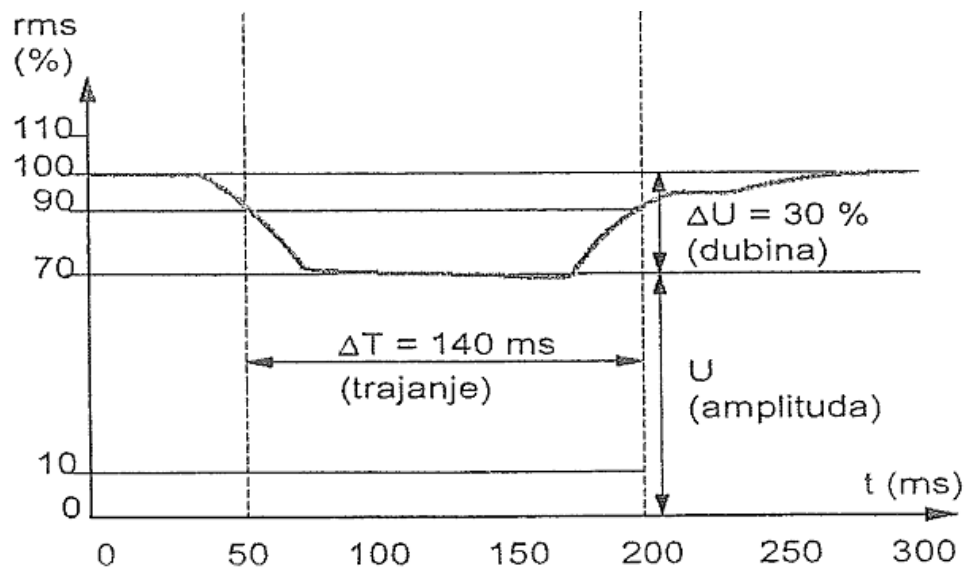
1. Uticaj krutosti mreže na propade napona pri startovanju asinhronog motora

Propad napona je jedan od najozbiljnijih problema kvaliteta električne energije. Propad napona predstavlja kratkotrajno smanjenje efektivne vrednosti napona do vrednosti između 10 % i 90 % naznačene vrednosti napona obično u trajanju od polovine periode do 1 min. Na slikama 1 i 2 prikazan je tipičan vremenski oblik propada napona i njegovi karakteristični parametri. Uzroci propada napona su kratki spojevi, uključenje velikih potrošača (asinhronih motora i elektrolučnih peći) i preopterećenje u mreži. Ovaj fenomen ima globalni karakter budući da zahvata deo mreže, a ne samo jedan čvor. Najčešće posledice su ispadi ili greške u radu osetljive električne opreme: digitalnih uređaja (računari, procesna oprema u industriji: PLC, mikrokontroleri, robotika...; audio i video uređaji u domaćinstvu), releja i kontaktora. Stoga propadi napona uzrokuju velike probleme u regulisanim elektromotornim pogonima i računarskim sistemima. Prevencija propada napona postiže se uređajima za besprekidno napajanje i različitim kondicionerima snage.

Posledice propada napona su otkazivanje opreme, prekid programa, gubitak informacija, prekid proizvodnog procesa ili oštećenje industrijskih proizvoda. Budući da su propadi napona daleko češći od prekida napajanja, šteta uzrokovana propadima napona čak povlači veće troškove nego šteta uzrokovana prekidima napajanja.



Slika 1. Vremenski oblik propada napona.



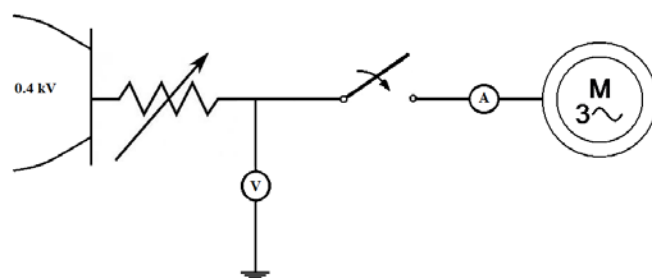
Slika 2. Karakteristični parametri propada napona.

Prilikom uključanja velikih asinhronih motora struja motora je 5-7 puta veća od naznačene struje motora. Ovakva struja uključanja obično uzrokuje propade napona dubine do 15 %. Dubina propada napona prilikom startovanja asinhronog motora izrazito zavisi od impedanse mreže. Jaka ili kruta mreža je mreža male impedanse. Sa porastom impedanse mreže padovi napona u mreži su veći, što dovodi do većih propada napona u čvorovima mreže.

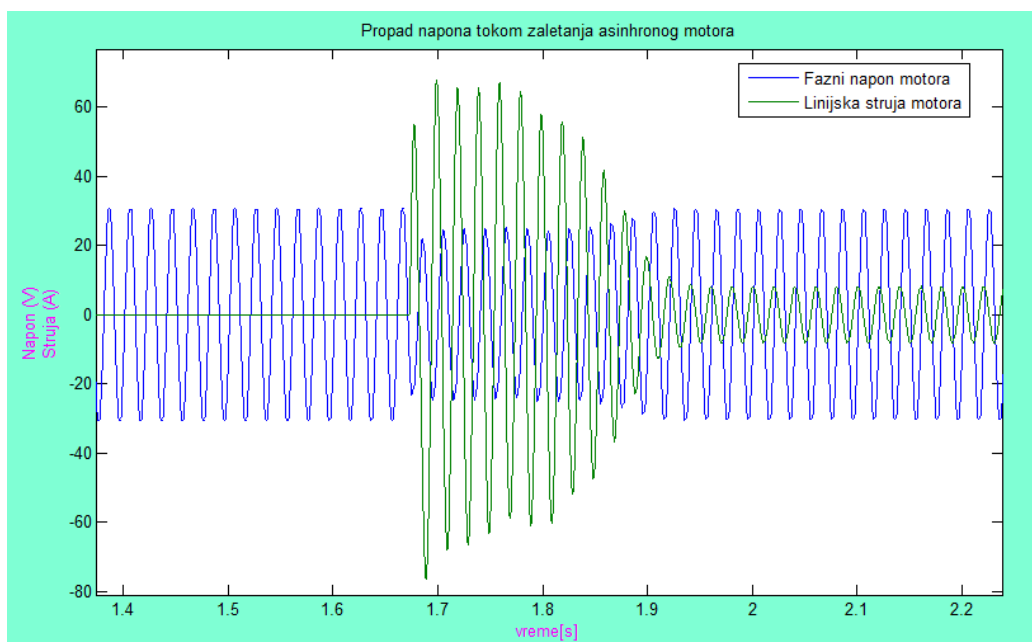
Trajanje propada napona usled startovanja motora zavisi pre svega od inercije motora i njegovog opterećenja. Moment motora proporcionalan je kvadratu napona na priključcima motora. Razlika između pogonskog momenta i momenta opterećenja određuje ubrzanje motora, a time i vreme zaletanja motora. Ukoliko je propad napona veliki, moguće je da odreaguje podnaponska zaštita ili da polazni moment postane manji od momenta opterećenja i da ne može da pokrene mašinu ili da zaletanje motora traje suviše dugo i da zaštita od preopterećenja prekine zaletanje motora

Propad napona utiče i na ostale motore u mreži. Motori koji su priključeni na iste sabirnice kao i motor koji se pušta u rad će usporiti. Naime, smanjenje napona na priključcima motora trenutno smanjuje moment mašine. Kad moment mašine postane manji od momenta opterećenja, mašina usporava, klizanje raste, reaktivna snaga motora raste, struja motora raste dok se faktor snage smanjuje. Ovo povećanje struje dovodi do dodatnog smanjenja napona na priključcima motora.

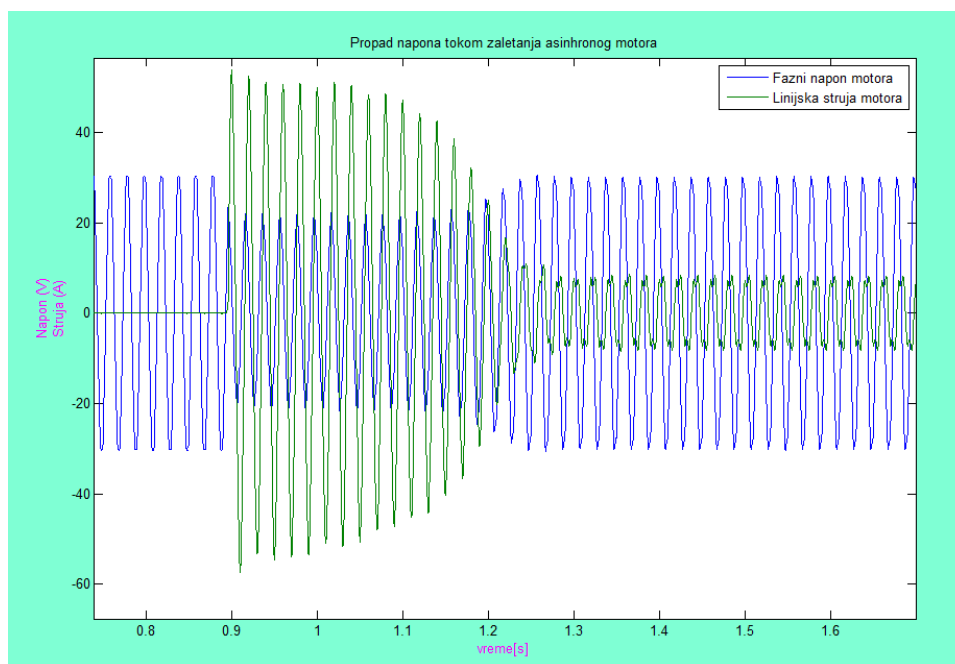
U ovoj vežbi izvedeno je direktno puštanje u rad asinhronog motora (pod punim naponom) koji nije opterećen. Ovo je najjednostavniji i najjeftiniji način zaletanja motora. Propad napona na priključcima motora snimljen je za različite vrednosti impedanse mreže (slika 3). Slaba mreža je modelovana otpornikom između motora i priključka na niskonaponsku mrežu. Na osnovu snimljenih vremenskih oblika napona i struja (slike 4 i 5) može se zaključiti da povećanje impedanse mreže povećava dubinu i trajanje propada napona.



Slika 3. Merna šema



Slika 4. Propad napona tokom startovanja asinhronog motora pri $R = 1.5 \Omega$.



Slika 5. Propad napona tokom startovanja asinhronog motora pri $R = 3 \Omega$.

2. Uticaj harmonijskih izobličenja mrežnog napona na asinhronu mašinu

Asinhroni motori su u savremenim elektroenergetskim sistemima izloženi nesinusoidalnim uslovima rada usled prisustva velikog broja nelinearnih elemenata u sistemu:

- elektrolučne peći, elektrolučni aparati za zavarivanje, fluorescentne lampe
- regulisani naizmenični i jednosmerni elektromotorni pogoni
- transformatori i generatori sa zasićenim magnetskim kolom
- FACTS uređaji
- prekidački izvori napajanja
- obnovljivi izvori energije
- HVDC mreže
- personalni računari, audio i video oprema u domaćinstvima.

Što se tiče obrtnih mašina, povećanje gubitaka u mašini je najozbiljnija posledica prisustva viših harmonika. Viši harmonici povećavanju gubitke u statorskom i rotorskom električnom i magnetnom kolu. Naime, viši harmonici u naponu izazivaju dodatno dielektrično naprezanje izolacije mašine što smanjuje životni vek mašine. Viši harmonici struje povećavaju efektivnu vrednost struje, pa su i Džulovi gubici veći. Usled viših učestanosti skin efekat je izraženiji, gubici usled vrtložnih struja i histerezisa su veći. Svaki harmonik struje stvara sopstveni fluks rasipanja stogu su gubici usled rasutog fluksa veći. Pri tome je raspodela gubitaka u mašini neravnomerna, usled čega se u mašini javljaju vruće tačke koje lokalno slabe izolaciju namotaja. Fluks viših harmonika indukuje struje visokih učestanosti u rotoru. Kao rezultat imamo veliko zagrevanje rotora i pojavu oscilacija ili redukcije momenta. Oscilatorni moment mašine može da utiče na kvalitet proizvoda u industriji, povećava vibracije mehaničkih delova i buku, što dovodi do ubrzanog starenja mašine ili čak može da izazove pojavu mehaničke rezonancije.

Motori mogu da rade bez opasnosti od pregrevanja ukoliko se napajaju naponom koji je izobličen manje od 5%. Izobličenje napona i struje definiše se preko indeksa totalne harmonijske distorzije. Totalna harmonijska distorzija je mera odstupanja periodičnog signala od sinusoide i predstavlja odnos između efektivne vrednosti viših harmonika i efektivne vrednosti osnovnog harmonika. Totalna harmonijska distorzija napona je prema tome:

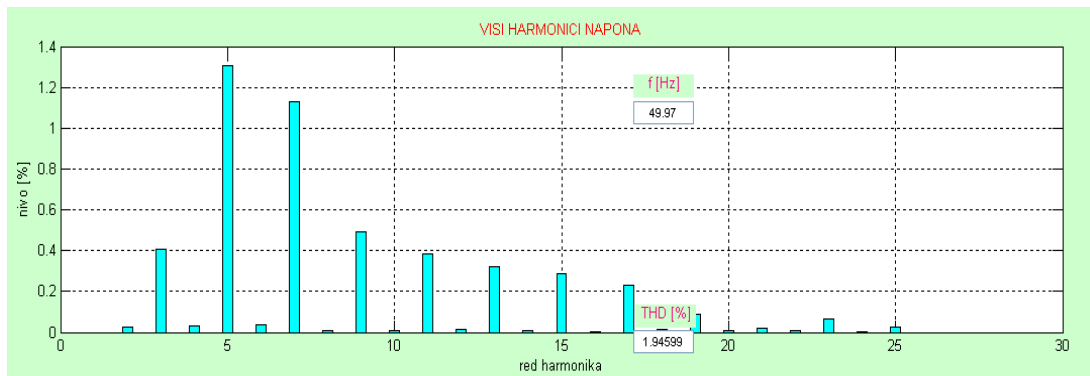
$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

dok je individualna distorzija harmonika napona jednaka količniku $\frac{V_h}{V_1}$. Sadržaj harmonika u mreži tokom normalnog radnog režima ograničava se prilikom planiranja mreže na vrednosti date u tabeli 1.

U ovoj vežbi analiziran je uticaj harmonijskih izobličenja napona napajanja na harmonijski sastav statorske i rotorske struje asinhronog motora. Stator asinhronog motora je vezan u zvezdu. Motor je priključen na niskonaponsku mrežu. Spektar napona napajanja prikazan je na slici 6. Sadržaj parnih harmonika je zanemariv dok su od neparnih dominantni 5. i 7. harmonik, zatim 3, 9, 11, 13, 15, 17, i 19. harmonik.

Tabela 1. Maksimalna dozvoljena izobličenja napona u mrežama različitih naponskih nivoa tokom normalnog radnog režima prema standardu IEEE 519-1992.

Napon u tački zajedničkog priključenja	Individualna harmonijska distorzija (%)	Totalna harmonijska distorzija THD (%)
$U \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$U > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5



Slika 6. Viši harmonici napona.

Spektar struja koje se uspostavljaju u namotajima statora zavisi od toga da li je zvezdište statora uzemljeno. Harmonici reda $3k$, $k=1,2,\dots$ predstavljaju tzv. sistem struja nultog redosleda koje se mogu uspostaviti jedino ukoliko u kolu postoji nulti provodnik. Naime, struje ovih harmonika su u fazi, npr. za 3. harmonik važi da je:

$$\begin{aligned}
 i_{a3} &= I_{m3} \cos(3\omega t) \\
 i_{b3} &= I_{m3} \cos 3(\omega t - 2\pi/3) = I_{m3} \cos(3\omega t) \\
 i_{c3} &= I_{m3} \cos 3(\omega t + 2\pi/3) = I_{m3} \cos(3\omega t).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Na osnovu *I Kirchhoff*-ovog zakona za statorsko kolo motora sa neuzemljenim zvezdištem u svakom trenutku važi:

$$i_{a3} + i_{b3} + i_{c3} = 0 \tag{3}$$

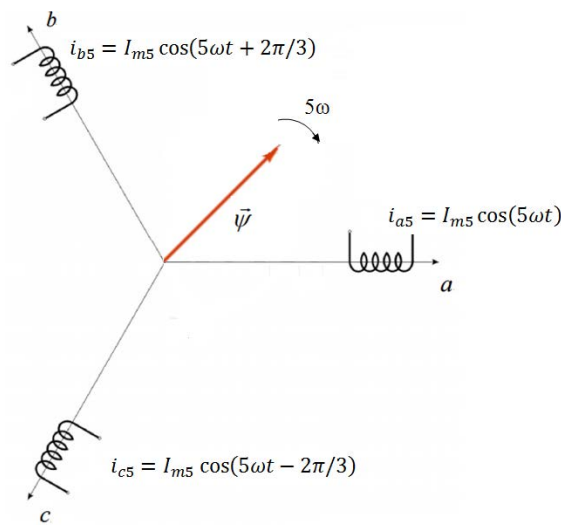
odnosno $3I_{m3} \cos(3\omega t) = 0$, odakle sledi da je $I_{m3} = 0$.

Ukoliko bismo uzemljili zvezdište statora, u struji statora bi se uspostavila struja sa visokim sadržajem 3. harmonika. Razlog je što se fluksevi 3. harmonika faznih struja uspostavljaju lošim magnetskim putevima velike magnetske otpornosti zahvaljujući tome što ih uzrokuju jednovremene struje istog intenziteta u namotajima koji su međusobno pomereni za 120° u prostoru. Stoga celokupan fluks 3. harmonika struje predstavlja fluks rasipanja

statorskog namotaja. Prema tome, sistem struja 3. harmonika ne formira obrtno polje u mašini i ne doprinosi elektromehaničkoj konverziji u motoru.

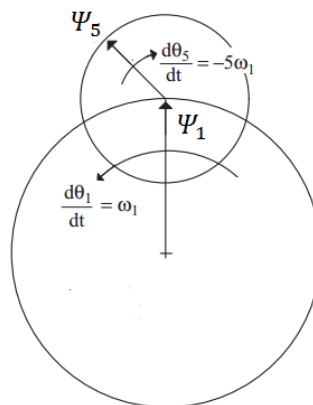
Harmonici reda $3k+1$ i $3k+2$, $k=1,2,\dots$ su prisutni u struji statora bez obzira na to da li je zvezdište statora uzemljeno ili ne. Simetričan sistem harmonika faznih struja $3k+2$ predstavlja sistem inverznog redosleda i u mašini formira inverzno polje obrtnog fluksa (slika 7). Npr, za struje 5. harmonika važi:

$$\begin{aligned} i_{a5} &= I_{m5} \cos(5\omega t) \\ i_{b5} &= I_{m5} \cos 5(\omega t - 2\pi/3) = I_{m5} \cos(5\omega t + 2\pi/3) \\ i_{c5} &= I_{m5} \cos 5(\omega t + 2\pi/3) = I_{m5} \cos(5\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$



Slika 7. Obrtno polje simetričnog sistema struja 5. harmonika.

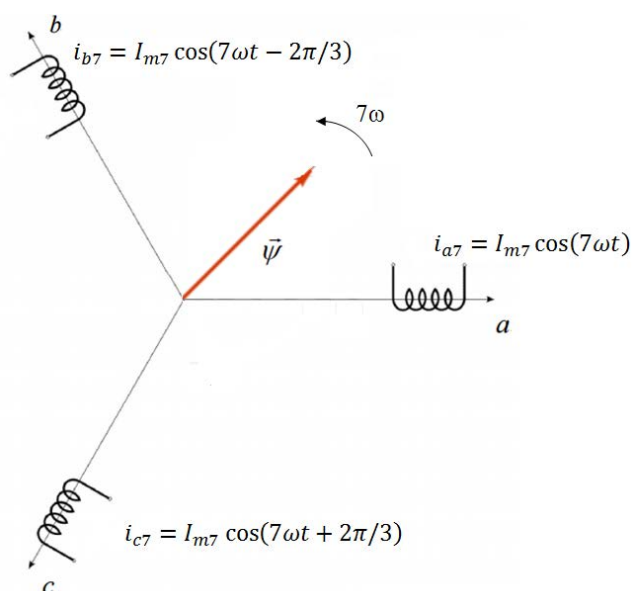
Obrtno polje 5. harmonika indukuje struje 6. harmonika u rotorskom namotaju. Naime, polje 5. harmonika rotira frekvencijom 5ω u smeru suprotnom od smeru kretanja rotora. Stoga u odnosu na rotor, polje 5. harmonika rotira brzinom 6ω i indukuje struje učestanosti 6ω . Na slici 8 prikazani su obrtni vektori fluksa osnovnog i 5. harmonika.



Slika 8. Rezultujući fluks struja osnovnog i 5. harmonika.

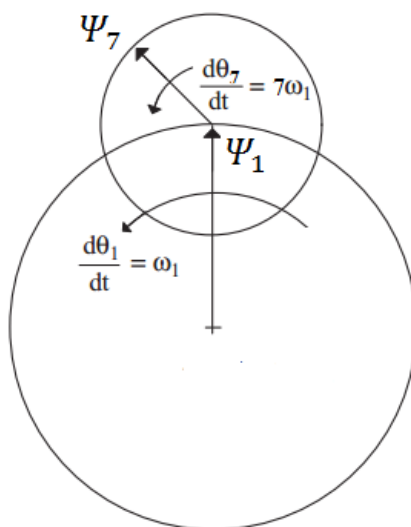
S druge strane, 7. harmonik i uopšte harmonici reda $3k+1$ predstavljaju sistem faznih veličina direktnog redosleda i formiraju direktno obrtno polje u mašini:

$$\begin{aligned} i_{a7} &= I_{m7} \cos(7\omega t) \\ i_{b7} &= I_{m7} \cos 7(\omega t - 2\pi/3) = I_{m7} \cos(7\omega t - 2\pi/3) \\ i_{c7} &= I_{m7} \cos 7(\omega t + 2\pi/3) = I_{m7} \cos(7\omega t + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (5)$$



Slika 9. Obrtno polje simetričnog sistema struja 7. harmonika.

Obrtno polje 7. harmonika takođe indukuje struje 6. harmonika u rotorskom namotaju. Polje 7. harmonika rotira frekvencijom 7ω u smeru kretanja rotora. Stoga u odnosu na rotor, polje 7. harmonika rotira brzinom $7\omega - \omega = 6\omega$ i indukuje struje učestanosti 6ω . Na slici 10 prikazani su obrtni vektori fluksa osnovnog i 7. harmonika.



Slika 10. Rezultujući fluks struja osnovnog i 7. harmonika.

Zaključci dosadašnje analize objedinjeni su u tabeli 2. U trofaznom simetričnom sistemu faznih veličina važi sledeće:

- Harmonici direktnog redosleda su harmonici reda $3k+1$
- Harmonici inverznog redosleda su harmonici reda $3k+2$.
- Harmonici nultog redosleda su harmonici reda $3k$, $k = 1, 2, \dots$

Tabela 2. Fazni redosled harmonika u trofaznom simetričnom sistemu faznih veličina.

Red harmonika	Fazni redosled
1	+
2	-
3	0
4	+
5	-
6	0
7	+
8	-
9	0

3. Uticaj neuravnoteženosti mrežnog napona na rad asinhronne mašine

Pod neuravnoteženim ili nebalansiranim sistemom faznih napona podrazumeva se sistem faznih napona određene učestanosti čije je zbir različit od nule. Takvi naponi se *Fortescue*-ovom transformacijom mogu dekomponovati u 3 sistema faznih veličina: direktnog, inverznog i nultog redosleda. Ako asinhroni motor priključimo na trofazni izvor neuravnoteženih faznih napona industrijske učestanosti, direktne komponente napona uspostaviće struje direktnog redosleda u statoru, a ove elektromagnetsko obrtno polje koje rotira u direktnom smeru. Inverzne komponente napona uzrokuje statorske struje inverznog redosleda, koje formiraju elektromagnetsko obrtno polje koje rotira u inverznom smeru. Komponente napona nultog redosleda ne stvaraju obrtno polje.

Posledica neuravnoteženog napajanja je smanjenje momenta mašine i dodatno zagrevanje rotora u kojem se indukuju struje drugog harmonika. Struje drugog harmonika indukuje obrtni fluks inverznih komponentata struja koji rotira u smeru suprotnom od smera kretanja rotora. Kritičan slučaj neuravnoteženog napajanja asinhronog motora predstavlja dvofazno napajanje motora.

Neuravnoteženost napona može da se javi i u višim harmonicima. Ukoliko npr. imamo neuravnotežene 5. harmonike faznih napona, direktne komponente ovih napona bi stvorile obrtni fluks koji rotira u direktnom smeru, inverzne komponente bi stvorile obrtni fluks koji rotira u inverznom smeru, dok bi nulte komponente 5. harmonika formirale samo fluks rasipanja u mašini.