	Tehnički članak	бр. QZ.01.06
	Efekti povećanog harmonijskog izobličenja napona i struja	Датум: 11-12-2012

Transformatori

Uticaj viših harmonika napona i struja na namotaje transformatora često prolazi neprimećen, dok ne dođe do havarije. U nekim slučajevima transformatori koji su dugi niz godina radili zadovoljavajuće, ubrzano su propadali kada se priroda potrošača u pogonu pomenila ili se promenila konfiguracija mreže. Promene mogu obuhvatiti instalaciju frekventnih regulatora, elektronskih balasta, kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage, elektrolučnih peći kao i dodavanje ili uklanjanje velikih elektromotora.

Više harmonične komponente napona uvećavaju gubitke u gvožđu u magnetnom jezgru transformatora. Više harmonične komponente struje povećavaju gubitke, tj. grejanje, usled gubitaka u bakru i gubitaka usled povećanja fluksa rasipanja. Sve navedeno, a posebno povećanje brzine promene napona, tj. dv/dt , dovode do povećanog naprezanja izolacije namotaja. Temperaturni ciklusi i rezonansa između induktivnosti namotaja i kondenzatora mogu stvoriti dodatne gubitke. Mikro vibracije dinamo limova se povećavaju zbog prisustva viših harmonika, što se primećuje kao povećanje buke, tj. zujanja transformatora.

Još veći doprinos gubicima daju vrtložne struje u namotajima. Vrtložne struje su strujni krugovi unutar provodnika uzrokovani relativnim kretanjem magnetnog polja usled rasipanja u odnosu na provodnik. Koncentracija vrtložnih struja je veća prema krajevima transformatorskog namotaja usled povećanja gustine fluksa rasipanja na krajevima namotaja. Ovo je dominantni izvor dodatnih gubitaka u namotajima, tako da se u inženjerskoj praksi često ostali izvori zanemaruju (rasipanje, histerezisni gubici, itd...). Gubici usled vrtložnih struja povećavaju se sa kvadratom struje u provodniku i sa kvadratom njihove učestanosti. Znači, ako struja opterećenja sadrži 20% struje 5. Harmonika (što je čest slučaj u praksi), dodatni gubici usled vrtložnih struja će biti $5^2 \times 0.2^2$, tj. ukupni gubici usled vrtložnih struja će se udvostučiti.


Povećanje gubitaka usled vrtložnih struja ima značajan efekat na radnu temperaturu transformatora. Zbog toga se transformatori, za koje se zna da će napajati nelinearne potrošače, unapred predimenzionišu u zavisnosti od udela viših harmonika u struji opterećenja (K faktor), kako bi mogli podneti povećani nivo gubitaka.

Svi distributivni transformatori u mreži EPS su sprege Dy. Kod ove sprege, struje nultog redosleda ostaju zarobljene u primarnom namotaju i cirkulišu unutar primarnog namotaja, te izazivaju lokalno pregrevanje namotaja. Sa sekundarne strane ovakvih transformatora, struje neutralnog redosleda nelinearnih potrošača se ne poništavaju u neutralnoj tački, već se sabiraju što dovodi do povećanja struje 3. harmonika u neutralnom provodniku te povećanog zagrevanja namotaja transformatora i neutralnog provodnika.

Elektromotori

Momenat asinhronog motora je proizvod interakcije magnetnog polja u međugvožđu i struja koje se indukuju u rotoru. Kada se motor napaja nesinusoidalnim naponom (i strujama), polje u međugvožđu i rotorske struje sadrže više harmonične komponente.

Case study	Autor: N. Laketić	1/4
------------	-------------------	-----

	Tehnički članak	бр. QZ.01.06
	Efekti povećanog harmonijskog izobličenja napona i struja	Датум: 11-12-2012

Harmonične komponente, u zavisnosti od svoje učestanosti, mogu biti direktnog, inverznog ili nultog redosleda. Komponente direktnog redosleda su 1,4,7,10,13, itd. stvaraju momenat koji vratilo obrće u direktnom smeru, tj. u istom smeru kao i osnovni harmonik). Komponente inverznog redosleda su 2,5,8,11,14, itd. i stvaraju momenat koji se obrće u inverznom smeru, tj. suprotno od smera momenta koji stvara osnovni harmonik. Komponente nultog redosleda su 3,9,15,21, itd. ne razvijaju obrtni momenat, ali nose energiju koja se disipira u vidu toplote. Znači polje osnovnog harmonika obrće osovinu motora u pozitivnom smeru nominalnom brzinom motora, polje 5. harmonika pokušava da okreće osovinu u suprotnom smeru 5 puta većom brzinom od nominalne, polje 7. harmonika pokušava da okreće osovinu u direktnom smeru 7 puta većom brzinom, itd... Rezultat je da slaganje uticaja polja pozitivnog i negativnog redosleda stvara mehaničke torziona oscilacije (vibracije) na osovini i povećane mehaničke gubitke u radu motora. Ako se učestanost vibracija poklopi sa sopstvenom mehaničkom učestanosti osovine, vibracije se pojačavaju i moguća su ozbiljna oštećenja osovine. Ukoliko se uzme u obzir da u modernim industrijskim pogonima nije neuobičajeno da 5. i 7. harmonik napona dosegnu 5% nominalnog napona pa i više, mogu se približno shvatiti razmere mehaničkih gubitaka u elektromotorima zbog pogoršanog kvaliteta napona. Zbog toga je kod većih frekventno regulisanih pogona, važno je da se izvrši analiza sadržaja i uticaja viših harmonika.

Slično kao i kod transformatora, harmonična izobličenja napona povećavaju električne gubitke u motoru i dovode do povećanog grejanja, zbog dodatnih gubitaka u bakru statorskog i rotorskog namotaja, te gubitaka u gvožđu (histerezis i vrtložne struje). Ovi gubici se dalje uvećavaju usled skin efekta koji postaje primetan na učestanostima iznad 300 Hz. Magnetno polje usled rasipanja, koje izazivaju harmonične struje statora i rotora na ivicama namotaja, stvara dodatne gubitke. Značajni gubici u gvožđu mogu nastati i kod motora sa iskošenim rotorskim žlebovima zbog indukovanih struja visoke učestanosti i brze promene fluksa (zbog histerezisa) u statoru i rotoru.

Prekomerno grejanje dovodi do degradacije svojstava masti za podmazivanje i na kraju i do havarije ležaja. Harmonične struje mogu dovesti do pojave struje u ležajevima, koje se najčešće sprečavaju montažom izolovanog ležaja, slično kao kod motora koji se napajaju sa frekventnog regulatora.


Prekomerno grejanje predstavlja važan faktor za ograničenje životnog veka motora. Za svakih 10°C porasta temperature iznad propisane, životni vek izolacionog materijala se smanjuje za 50%. Kavezni rotori su nešto oporniji na povišene temperature u odnosu na motore sa namotanim rotorom. Namotaji motora, posebno klase B ili niže, su osetljive na oštećenja usled velike strmine naponskog talasa tj. velikog dv/dt , kao što je slučaj kod komutacije ili kod viših harmonika.

Imajući u vidu da elektromotori čine najveći deo snage potrošača u prosečnom industrijskom pogonu, jasno je da je najveći deo ukupnih gubitaka pogona skoncentrisan upravo ovde. Ukoliko bi se poboljšanjem kvaliteta napona smanjili gubici na elektromotorima, energetska efikasnost čitavog pogona bi se značajno povećala.

Kablovi

Protok struje stvara Džulove gubitke RI^2 , koji se dispiraju u obliku toplote. Ovi gubici zavise kako od efektivne vrednosti struje (osnovni harmonik i viši harmonici) tako i od otpornosti kabla koja se menja sa učestanošću. Otpornost jednog kabla se definiše kao: otpornost pri proticanju jednosmerne struje plus

Case study	Autor: N. Laketić	2/4
------------	-------------------	-----

	Tehnički članak	бр. QZ.01.06
	Efekti povećanog harmonijskog izobličenja napona i struja	Датум: 11-12-2012

uticaji skin efekta i efekta blizine. Otpornost kabla se menja sa učestanošću struja koje protiču kroz kabl. Skin efekat je pojava gde struja ima tendenciju da protiče bliže površini provodnika, tj. u zoni gde je impedansa najmanja. Što je učestanost struje veća to skin efekat izraženiji, tj. struja teče u sve tanjem sloju bliže površini provodnika, što povećava otpornost kabla na datoj učestanosti jer se koristi manja površina poprečnog preseka. Dubina prodora struje kroz poprečni prečnik provodnika inverzno je proporcionalna sa kvadratnim korenom učestanosti. Analogni fenomen, efekat blizine, javlja se zbog uzajamne induktivnosti blisko položenih paralelnih provodnika. Oba efekta zavise od preseka provodnika, učestanosti, otpornosti i permeabilnosti materijala. Na osnovnoj učestanosti, skin efekat i efekat blizine su obično zanemarljivi, barem za manje provodnike. Gubici u provodnicima usled promene otpornosti mogu značajno porasti sa povećanjem sadržaja struja viših harmonika, s jedne strane zbog povećanja otpornosti usled skin efekta, a s druge strane usled povećanja same efektivne vrednosti struje. Ovaj mehanizam je najčešći uzrok povećane temperature kablova u postrojenjima gde postoji rezonansa.

Prekidači i osigurači

Najveći broj niskonaponskih prekidača magnetno-termičkog tipa koristi bimetalni sklop za reagovanje na prekomernu vrednost struje. U prisustvu nelinearnih potrošača, efektivna vrednost struje može biti veća nego u slučaju potrošača iste snage sa linearnom karakteristikom. Tada, osim ukoliko se ne prepodesi prag reagovanja zaštite, prekidač može reagovati preuranjeno.


Prekidači su dizajnirani da prekidaju struju u trenutku prolaska kroz nulu. Kod visoko izobličene struje, može se u jednoj periodi pojaviti nekoliko lažnih prolazaka kroz nulu, što uzrokuje prerano otvaranje polova prekidača. Sa druge strane, u slučaju kratkog spoja, intenzitet struje viših harmonika je mali u poređenju sa strujom kvara, te ovaj efekat nije dominantan.

Reagovanja osigurača u uslovima preopterećenja ili kratkog spoja, baziraju se na toploti koju razvija efektivna vrednost struje, a prema odgovarajućoj I^2t karakteristici. Što je viša efektivna vrednost struje to će osigurač brže reagovati. U prisustvu nelinearnih potrošača ili kod rezonanse, efektivna vrednost struje će biti viša nego kod linearnog potrošača iste snage, zbog čega može doći do prevremenog reagovanja. Dodatno, na učestanostima viših harmonika, i sami osigurači imaju izražen skin efekat i, još značajnije, efekat blizine, što dovodi do neuniformne raspodele struje po delovima osigurača, stavlajući povećano termičko naprezanje osigurača.

Osvetljenje

Lako uočljiv efektat uticaja viših harmonika na osvetljenje je fenomen nazvan „flicker“, gde se javljaju povremene ili stalne promene intenziteta osvetljenja. Osvetljenje je osetljivo na promene efektivne vrednosti napona, čak i manja promena (reda veličine 0.25%) je, kod nekih tipova svetiljki, vidljiva golim okom. Superponirani interharmonici u naponu napajanja su značajan izvor flikera i kod inkadescentnih i kod fluorescentnih sijalica. Izobličen napon kod nekih tipova elektronskih balasta može dovesti do povećanog broja otkaza.

Case study	Autor: N. Laketić	3/4
------------	-------------------	-----

	Tehnički članak	бр. QZ.01.06
	Efekti povećanog harmonijskog izobličenja napona i struja	Датум: 11-12-2012

Kondenzatori

Viši harmonici struja se prirodno zatvaraju preko kapacitivnosti (manji otpor), te su kondenzatori i kondenzatorske baterije izložene povećanom strujnom naprezanju i gubicima. Kada je odnos kapacitivnosti kondenzatora i induktivnosti energetskog transformatora takav da se rezonantna tačka formira u blizini nekog od dominantnih harmonika struje, dolazi do pojave cirkulacionih struja na učestanosti datih harmonika između sekundara transformatora i kondenzatorskih baterija, koje su ograničene samo omskim otporima u tom krugu. Tada dolazi do ubrzanog starenja dielektrika u baterijama i najčešće do havarije same baterije. Ovo stanje se prepoznaje po tome što kondenzatorske baterije na početku radog veka počinju brzo da otkazuju, a kada otkáže dovoljan broj baterija havarije prestaju. Po zameni baterija novim, sve počinje ispočetka. Povećano strujno naprezanje kondenzatora i sekundara transformatora, naravno, praćeno je povećanim gubicima aktivne energije zbog prekomernog grejanja i skin efekta.

EMI

Energetski kablovi kroz koje protiču viši harmonici struja ponašaju se kao izvori EMI (Elektromagnetna interferencija) smetnji u obližnjim signalnim i kontrolnim kablovima. Ove smetnje imaju izražen uticaj na telefoniju, televiziju, radio, računare, kontrolne sisteme i drugu osetljivu opremu. Da bi se minimizirao uticaj ovih smetnji potrebno je pravilno polagati signalne i energetske provodnike kao i pravilno vršiti uzemljenje kućišta.

Reference

- [1] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, ANSI/IEEE Std. 519-1992.
- [2] Industrial and Commercial Power Systems Analysis, ANSI/IEEE Std. 399-1990.
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland and William P. Robbins, Power Electronics: Converter, Applications and Design, Wiley, 3rd edition, 2002.
- [4] Kevin lee, Derek A. Paice and James E. Armes, "The Wind Mill Topology - Evaluation of Adjustable Speed Drive Systems", IEEE IAS Magazine, Mar/Apr 2009.
- [5] ABS Guidance Notes on Control of Harmonics in Electrical Power Systems, American Bureau of Shipping, 2006
- [6] Electric Power Distribution for Industrial Plants, ANSI/IEEE Std. 141-1986.
- [7] IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE Std 1531-2003.

Case study	Autor: N. Laketić	4/4
------------	-------------------	-----