

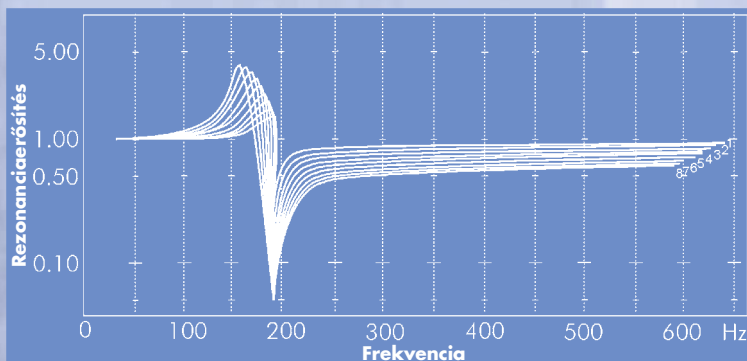
Villamosenergia – minőség – Alkalmazási segédlet



Harmonikusok

Kondenzátorok torzított hálózaton

3.1.2



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

EUROPEAN
COPPER
INSTITUTE

Harmonikusok

Harmonikusok

Kondenzátorok torzított hálózaton

Stafan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut
2004. július

Magyar Rézpiaci Központ

Hungarian Copper Promotion Centre (HCPC)

A Magyar Rézpiaci Központ a réztermelők és feldolgozók által támogatott non-profit szervezet, amelynek célja a réz és a rézötvözetek használatának, valamint helyes és hatékony alkalmazásának elősegítése. A szolgáltatások, beleértve a műszaki tanácsadást és információs adatközlést, mindazok rendelkezésére állnak, akik bármilyen vonatkozásban érdekeltek a réz felhasználásában. Az egyesülés összeköttetést teremt a kutatás és a felhasználó ipar között, és szoros kapcsolatot tart fenn a világ többi – a rézpiac fejlesztésén tevékenykedő- szervezetével.

Európai Réz Intézet

European Copper Institute (ECI)

Az Európai Réz Intézet az ICA (International Copper Association) és az IWCC (International Wrought Copper Council) támogató tagjai által létrehozott szervezet. Tagjain keresztül az ECI a világ legnagyobb réztermelői és Európa vezető réztermék gyártói nevében dolgozik a réztermékek európai piacfejlesztésén. Az 1996 januárjában megalakult ECI-t tíz Rézpiac Fejlesztési Egyesület (CDA-k) hálózata támogatja a Benelux államokban, Franciaországban, Németországban, Görögországban, Magyarországon, Olaszországban, Lengyelországban, Skandináviában, Spanyolországban és az Egyesült Királyságban. Ezen tevékenység folytatása azon erőfeszítéseknek, amelyeket az 1959-ben alakult Copper Products Development Association (CPDA) és az 1961-ben alakult International Copper Research Association (INCRA) kezdeményezett.

Figyelmeztetés

A Magyar Rézpiaci Központ és az Európai Réz Intézet elhárítja a felelősséget bármilyen közvetlen, közvetett, okozati, vagy véletlenszerű meghibásodásért, amely az ebben a kiadványban közölt információk felhasználásából, vagy az információk illetve a közölt adatok fel nem használhatóságából eredhetnek.

Szerzői jog©: Copper Development Association (CDA)

Magyar fordítás: Magyar Rézpiaci Központ

A kiadvány anyagának másolása, terjesztése engedélyezett, feltéve, hogy az teljes terjedelemben, a forrás megjelölésével történik.



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

Magyar Rézpiaci Központ

H-1053 Budapest,

Képiró u. 9.

Magyarország

Tel: (+36 1) 266 48 10

Fax: (+36 1) 266 48 04

E-mail: info@hcpcinfo.org

Web: www.hcpcinfo.org



Kondenzátorok torzított hálózaton

Régi üzem új környezetben

Az alapharmonikus meddőteljesítmény kompenzálására használt kondenzátortelemek az ohmos-induktív terheléseket tartalmazó rendszerek gazdaságos üzemeltetéséhez elengedhetetlenek. Valójában az erősáramú technika megjelenésétől kezdve az ohmos-induktív terhelések mindenütt jelen vannak. Azonban mióta a nemlináris fogyasztók is mindennaposakká váltak, a kondenzátortelekkel kapcsolatban két új veszély lépett fel:

- ◆ A kondenzátorok árammal való túlterhelése
- ◆ A kapacitások és a (villamos) környezetükben lévő induktivitások párhuzamos rezonanciája.

A kompenzáló kondenzátorokra továbbra is szükség van, és meglehetősen könnyű úgy megtervezni őket, hogy megfeleljenek az új kihívásoknak. Ez a cikk az új kondenzátortelemek kialakításának vagy a már meglévők átala-kításának optimális megoldásait olyan szempontból tárgyalja, hogy alkalmasak legyenek a harmonikusok által okozott problémák kivédésére.

Alapok: Az induktivitások és a kapacitások jellemzői

A villamosság területén az induktivitás a mechanikai rendszerekben lévő tömegek tehetetlenségével analóg fogalom. A fojtótekerccs, azaz egy előre meghatározott nagyságú induktivitással rendelkező alkatrész egy adott tehetetlenségű lendkerék villamos megfelelője. Természetesen, mint ahogyan mindennek, aminek tömege van, annak tehetetlensége is van, úgy mindennek ami áramot vezet van induktivitása is.

Maradva a mechanikai hasonlatnál, a villamos kapacitás a mechanikai alkatrészek rugalmasságának felel meg. A kondenzátor egy előre meghatározott nagyságú kapacitással rendelkező alkatrész, amely a mecha-nikai rendszerben lévő rugó villamos megfelelője. Hasonlóan ahhoz, mint ahogyan minden testnek van bizo-nyos mértékű rugalmassága, úgy bármely két vezető között is fellép valamekkora kapacitás.

A rugóban és a tömegben tárolt energia nagysága a következő:

$$W_{spring} = \frac{D}{2} * s^2, \quad W_{mass} = \frac{m}{2} * v^2$$

ahol:

D = a rugalmassági modulus (egységnyi erő hatására létrejött megnyúlás, Hooke törvény)

s = megnyúlás (a nyugalmi helyzettől mért pillanatnyi távolság)

m = tömeg

v = ennek a tömegnek a mozgási sebessége

Az s megnyúlás és a v sebesség az időben periodikusan változnak, amelyeket az $s(t)$ és $v(t)$ időfüggvényekkel lehet megadni.

Legyen a mechanikai rendszer veszteségmentes, a tehetetlen tömeg tehát súrlódásmentesen vízszintes pályán mozog, összekötve egy nulla tömegű, egyik végén rögzített rugóval.

A tehetetlen tömeg és a rugalmas rugó együttesen egy kéttárolós rendszert képez. Az egyikből felszabaduló energia a másikba áramlik. A rugó megnyúlása és összehúzódása során a tehetetlen tömeg az összehúzódó rugóból származó erő hatására gyorsulni fog. A rugóerő nullaátmenetekor, a rugó hossza éppen nyugalmi helyzetében lesz, az összekötött rugó és tehetetlen tömeg sebessége a legnagyobb. A tömeg a tehetetlensége miatt tovább fog mozogni, miközben a rugót összenyomja, ezzel a mozgó test energiája visszaalakul a rugó-ban tárolt energiává.

Ha az energiatárolók egy kondenzátor és egy induktivitás (pl. tekerccs), akkor a megnyújtott/összenyomott rugóban lévő mechanikai feszültség a kondenzátor pozitív/negatív feszültségének felel meg, a tömeg sebes-sége pedig az áramnak, amely szintén rendszeres időközönként változtatja a polaritását. Minden egyes polaritásváltás azonos időközönként következik be, először a feszültség, majd az áram, negyed periódus-onként (vagy 90° -onként, mivel a mechanikai modellben a mechanikai feszültség és a sebesség, a villamos modellben pedig a feszültség és az áram mind szinuszosan változik). A 90° -os fáziseltolódás miatt azt is lehet

Kondenzátorok torzított hálózaton

mondani, hogy az egyik mennyiség koszinuszos változást követ, és így lineáris és veszteségmentes elemeket feltételezve a rezgés bármely időpillanatában igaz, hogy

$$\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$$

és minden egyes pillanatban a belső energia

$$W = \frac{C}{2} * u^2(t) + \frac{L}{2} * i^2(t) = const$$

Valós elemek esetén veszteség lép fel, és az áram és a feszültség közötti fáziseltolódás az induktív/kapacitív elemekben valamivel kisebb lesz, mint $\pm 90^\circ$.

Tételezzük fel, hogy egy kapacitást és egy induktivitást egymással párhuzamosan kötve magára hagyunk, de előtte a kapacitást feltöltöttük. A kondenzátor az induktivitáson keresztül kisül, majd ellenkező polaritással újra feltöltődik. Bármely L és C párhuzamos kapcsolása esetén létezik egy olyan f_0 frekvencia, amelynél a reaktanciák azonosak – ezt nevezük rezonancia frekvenciának. Ezt a frekvenciát, amelynél az LC kör oszcillál, a következőképpen számíthatjuk ki:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Ha a kondenzátort és az induktivitást váltakozó feszültségű hálózati elemként vizsgáljuk, f frekvenciájú feszültségre kapcsolva az áramot a reaktanciájuk határozza meg.

A reaktanciákat az alábbi összefüggésekkel lehet kiszámítani:

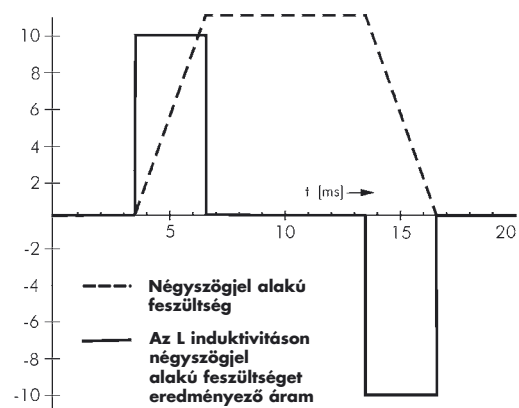
$$X_L = 2\pi f L \quad \text{és} \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Eszerint az X_L induktív reaktancia egyenesen arányos az f frekvenciával, míg az X_C kapacitív reaktancia fordítottan arányos az f frekvenciával. Mind az L induktivitás, mind pedig a C kapacitás meddőteljesítményt fogyaszt, de ellenkező előjellel, és meddőegyensúly esetén a negatív kapacitív meddőteljesítmény fogyasztás azaz betáplálás azonos az induktív meddőteljesítmény fogyasztással azaz felvétellel és fordítva. A valóságban a meddőteljesítmény áramlási irányát nem lehet egyértelműen meghatározni, mivel a kétszeres hálózati frekvenciával leng a hálózat kapacitív és induktív elemei között.

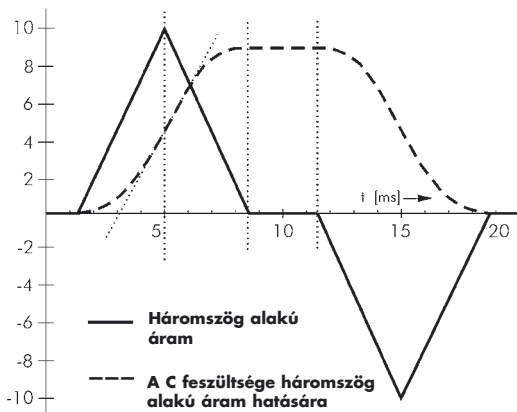
A feszültséghez képest siető áramokkal kapcsolatban kissé nehéznek tűnik elképzelni, hogy a kapacitív áram honnan tudja előre, hogy az őt egy negyed periódussal követő feszültség hatására mit kell tennie, de a valóságban ez történik. Egészen pontosan, a feszültség megváltozásához képest késő vagy siető minden áramváltozást a kondenzátorban tárolt energia és a hullámalak egyedi tulajdonságai határoznak meg.

Miért különleges a szinuszhullám?

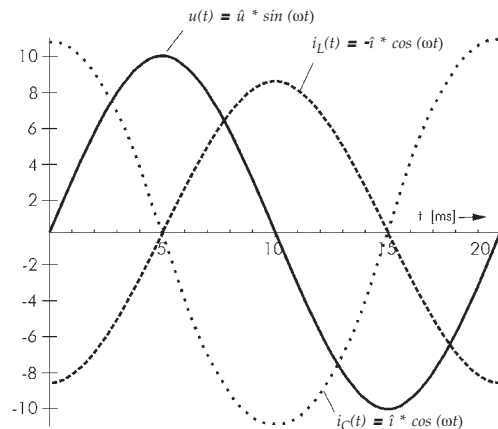
A szinuszos feszültség szinuszos áramot hajt, a szinuszos áram hatására pedig szinuszos feszültségesés jön létre. Ez csak szinuszos hullámalakra igaz, vagy tetszőleges függvény esetén? A válasz tömören az, hogy ez a szinuszhullám jellegzetessége. Nézzük az 1. és 2. ábrákon szereplő másfajta hullámalakokat. Csak a tisztán ohmos elemek esetén igaz az, hogy a feszültség pillanatértéke megegyezik az áram pillanatértékével, azaz tetszőleges feszültségalakok azonos alakú áramalakokat hoznak létre és fordítva. Reaktív terhelések (pl. L induktivitás) esetén a feszültség pillanatértéke az áram időbeli változásának mértékével (di/dt) arányos vagy (C kapacitás esetén) az áram a feszültség időbeli változásának mértékével (du/dt) arányos. Ugyanez igaz a szinuszos és koszinuszos hullámalakok esetén is.



1. ábra Trapéz alakú áram négyzögjel alakú feszültséget hoz létre az ideális (veszteségmentes) fajtótekercsben



2. ábra Kapacitáson átfolyó háromszög alakú áram

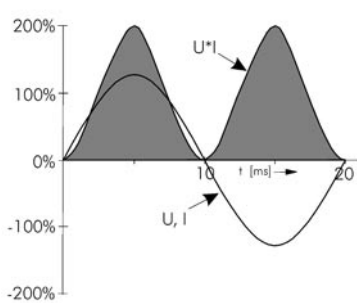


3. ábra Reaktív elemeken a szinuszos feszültség koszinuszos áramokat hajt át

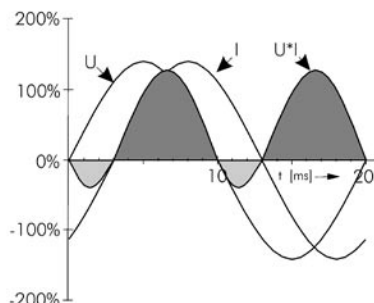
A szinuszos feszültség- és áramhullámok alakjai megegyeznek a tisztán ohmos és a reaktív elemeken, csak fáziseltolás lép fel közöttük. A reaktív elemeken a feszültség az áram *változásának* mértékével arányos. A szinusz deriváltja azonban koszinusz, amelynek azonos az alakja, csak a kezdőpontja különböző. Mivel a tápfeszültség és az áram kezdőpontjának nincs jelentősége, ezért úgy tűnik, hogy a szinuszos feszültség szinuszos áramot hajt, a szinuszos áram pedig szinuszos feszültségesést hoz létre, amelyek között valamekkora fáziseltolás jelentkezik.

Mi a meddőteljesítmény?

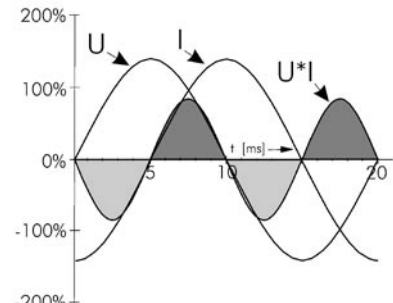
A tisztán ohmos terheléseken a feszültség és az áram pillanatértékei egyenesen arányosak egymással (4. ábra), míg a reaktív elemeken nem (6. ábra). Az utóbbi esetben, ha az egyik mennyiség hullámalakja szinuszos, akkor a másik is az lesz, de a kettő között fáziseltolás lép fel; emiatt a váltakozó áram minden periódusának kettő negyedében azonos a polaritásuk, míg kettő negyedében ellentétes. Az alatt az idő alatt, amíg a feszültség és az áram polaritása ellentétes, a kettő szorzata, azaz a teljesítmény is negatív lesz, ezzel teljesítmény felvétel helyett átmenetileg teljesítmény leadás megy végbe. Ha a periódus előző negyedében felvett villamos energiát nem használjuk fel (pl. másfajta energiává, mint pl. hőenergiává való átalakítás révén), akkor ezt most visszatápláljuk a hálózatba. Minden egyes teljes periódusban a tényleges átvitt „hatásos” energia a teljesítmény integráljával egyezik meg, amely a feszültség és áram időfüggvényeinek szorzata alatti terület (az ábrán a sötétített területek). Az abszcissa alatti területeket az abcissa fölöttiekből ki kell vonni. Amint látjuk a 6. ábrán, a meddő teljesítmény egy alapharmonikus periódusra vett integrálja nulla, mely érték két pozitív és két negatív rész integrál eredőjeként adódik. A pozitív és a negatív rész integrálok a kapacitások és az induktivitások közötti kétszeres frekvenciájú energia lengésnek felelnek meg.



4. ábra: Tisztán ohmos terhelés



5. ábra: Ohmos-induktív terhelés



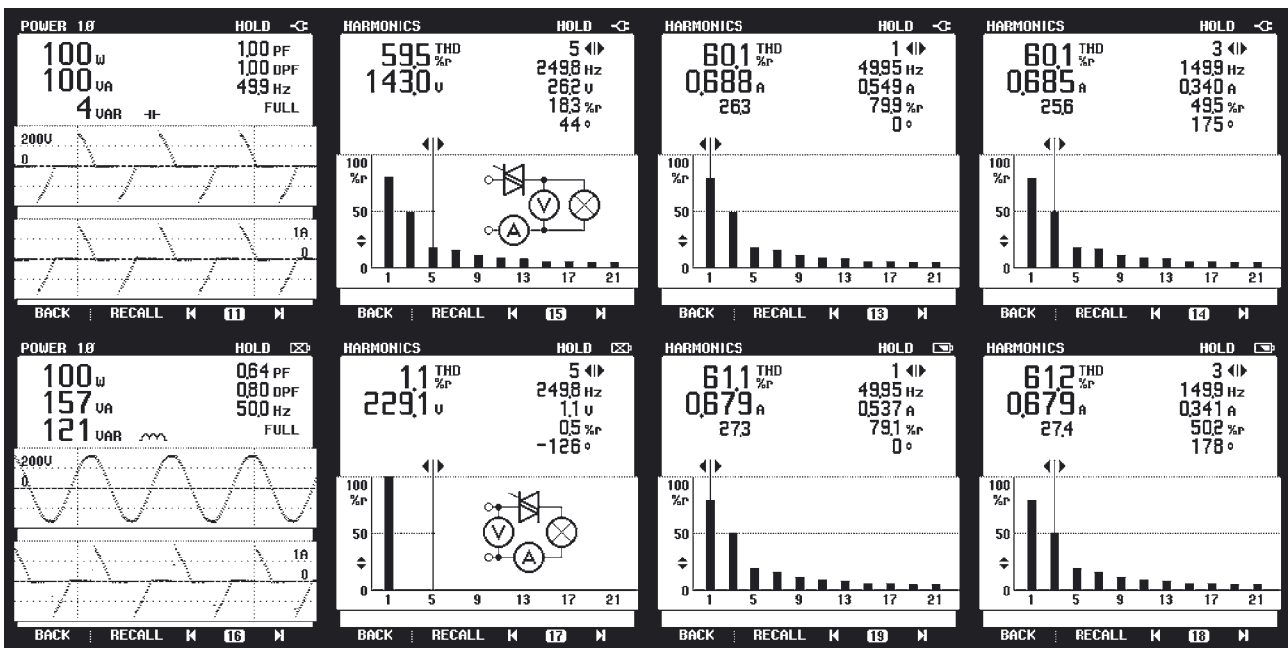
6. ábra: Induktív terhelés

A szinuszos feszültségekkel és reaktív terhelésekkel kapcsolatos meddőteljesítmény meghatározása viszonylag egyszerű. Meddőteljesítmény azonban a fázisszög-vezérelt ohmos terhelések esetén is jelentkezik. Egy német villamosági szaklapban egy szerző azt állította, hogy az ilyen terhelések (pl. a fényerő-szabályozós izzólámpák) nem hoznak létre alapharmonikus frekvenciájú meddőteljesítményt, mivel a teljes hullámalaknak nincs olyan része, amelyben a feszültség és az áram előjele ellentétes lenne. Ezzel nagy vitát váltott ki az

Kondenzátorok torzított hálózaton

olvasók között, akik rámutattak, hogy az ilyen fázisszög-vezérelt áram Fourier elemzése alapján az alapharmonikus áramhullám képest a feszültséghez képest, így bizonyított az alapharmonikus meddőteljesítmény léte. Mindkét álláspont logikusnak tűnik, de melyik az igaz?

A 7. ábra adja a megoldást. A terhelés felől nézve (a 7. ábra felső sora) nincs meddőteljesítmény – az áram fázisban van a feszültséggel (bár a hullámalakja torzított) és így az alapharmonikus eltolási tényező (DPF) értéke egy. Ugyanakkor a fogyasztót a betáplálva felől mérve az eredmény a 7. ábra alsó sorában látható. A feszültség hullámalakja a teljes szinusz görbe, az áram természetesen ugyanaz, ezért az eltolási tényező (DPF) értéke 0,8, induktív (ld. a W, VA és VAR méréseket).



7. ábra: Okoz-e egy fázisszög-vezérelt ohmos terhelés alapharmonikus frekvenciájú meddőteljesítményt vagy sem? Az áramszolgáltató szempontjából valóban befolyásolja a hálózatot, de energialengés, amely egyes szakértők szerint a meddőteljesítmény meglétének előfeltétele, nincs

Miért kell kompenzálni?

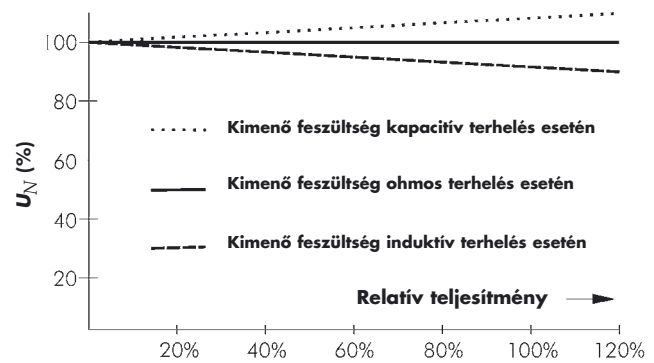
A normál hálózaton egyidejűleg sok fogyasztó van jelen. Ezek közül sok ohmos, míg vannak kapacitív jellegűek, amelyekben az áram siet a feszültséghez képest, és induktív jellegűek is, amelyekben az áram késik a feszültséghez képest. A legtöbb hálózaton az ohmos-induktív terhelések vannak túlsúlyban, ezért az eredő áram ohmos-induktív jellegű lesz (5. ábra). Ez folyamatos, de nem kívánatos energialengést eredményez, amely megnöveli a kábelekben és a transzformátorokban folyó áramot és így azok terhelését is. Mindez a wattos veszteségek növekedését okozza, és a terhelhetőségük nagy részét veheti igénybe. Ebből adódóan a kompenzáció alapvető célja a következők elkerülése:

- ◆ az átviteli kapacitás nem kívánt igénybevétele
- ◆ az ilyen módon keletkező energiaveszteségek
- ◆ a feleslegesen nagy áramok miatt az elosztó rendszerben keletkező nagy feszültségesések.

A feszültségeséseket illetően nézzünk egy gyakori esetet.

Kommunális transzformátorról táplálnak egy építkezésnél használt toronydarut. Az ilyen darukat rendszerint relékkel vezérelt háromfázisú indukciós motorok mozgatják, amelyeket gyakran kapcsolnak át a különböző funkciók között: megállás és indítás, lassú és gyors menet, le vagy fel. Ezeknek a motoroknak az indítási árama rendszerint nagyon nagy, a névleges áram többszöröse, ugyanakkor az indítási áramok jelentős induktív összetevőt tartalmaznak, a teljesítménytényezőjük $\cos \varphi \approx 0.3$, vagy a nagyobb gépeknél még ennél is kisebb. Az induktív indítási áram a kommunális közép/kisfeszültségű transzformátor szórásinduktíván (drop)

viszonylag nagy feszültségesést okoz, ami a normál fogyasztás által okozott feszültségeséshez képest olyan nagy lehet, hogy akár 1-2 % feszültség változást is okozhat, ami jelentős villogáshoz (flicker) vezethet. A 8. ábra kommunális transzformátor feszültségesését mutatja különböző terhelő áramok hatására. Látható, a motor indítási áramának induktív összetevőjét megfelelően méretezett és időben kapcsolt kompenzáló kondenzátor alkalmazásával könnyen ki lehet kompenzálni, és ezáltal az esetleg általa okozott villogást meg lehet szüntetni.



8. ábra: A transzformátorok (itt a HD 428 C felsorolása szerinti 630 kVA-es transzformátor) feszültségesése ohmos terhelés esetén kismértékű, induktív terhelés esetén nagy, kapacitív terhelés esetén pedig negatív

Hogyan kompenzáljunk a jelenlegi körülmények között?

Meddőteljesítmény szabályozás

Láttuk, hogy a feszültségesés csökkentése, a hálózati veszteség csökkentése érdekében a leghatékonyab beavatkozás a meddőteljesítmény szabályozása. A megoldás egyszerű, az ohmos-induktív fogyasztókkal párhuzamosan kapcsolunk megfelelő nagyságú kondenzátorokat oly módon, hogy ezek az induktív összetevőt kiegyenlítsék. Így, amint láttuk, a kondenzátorok és az induktív elemek között helyben kialakul a meddő-energia lengés és a meddő áram nem terheli a betáp hálózatot. Végül tehát az eredő áram a csökken, pedig egy újabb fogyasztót (kondenzátort) kapcsoltunk a hálózatra. Ezt nevezik *párhuzamos kompenzációnak*.

A megfelelő kivitelezéséhez ismerni kell az üzem induktív fogyasztóinak nagyságát, különben túlkompensálás fordulhat elő. Ilyenkor a létesítmény ohmos-kapacitív fogyasztóvá válhat, amely szélsőséges esetben még a kompenzáció nélküli esetenél is rosszabb helyzetet teremthet. Ha a terhelés – pontosabban annak induktív összetevője – változik, akkor változtatható kompenzátorra van szükség. Általában ezt kondenzátor csoportok relékkel történő be- és kikapcsolásával oldják meg. Ez természetesen a fellépő áramcsúcsok mellett az érintkezők elhasználódásával és összehegedésük veszélyével, valamint a kábelezéssel párhuzamosan vezetett adatvonalakban indukált túlfeszültségek megjelenésével jár együtt. Ügyelni kell a kapcsolások idejére is; ha a teljesen kisütött kondenzátorokra a hálózati feszültséget annak csúcsertékénél kapcsoljuk rá, akkor a bekapcsolási áramcsúcs a rövidzárási árammal egyezik meg. Még rosszabb a rövid idejű kikapcsolás utáni bekapcsolás, amikor a kondenzátor majdnem teljesen ellentétes polaritással van feltöltve. Ekkor a bekapcsolási áramcsúcs a létesítmény rövidzárási áramának közel a kétszerese is lehet! Ha ugyanabban a rendszerben több kapcsolóüzemű tápegység (SMPS) is üzemel, akkor a feltöltött kompenzáló kondenzátor a hálózatra visszakapcsolva közvetlenül sok kisütött simítókondenzátort táplálhat, mivel az áram többé-kevésbé az egyik kapacitásból közvetlenül folyik a másikba, amelyek között szinte alig van soros impedancia. Az eredő áramcsúcs időtartama igen rövid, de nagysága rendkívül nagy, sokkal nagyobb, mint a rövidzárlati áram!

Gyakran számolnak be a berendezések meghibásodásáról, különösen a kondenzátor csoportokat vezérlő relék érintkezőivel kapcsolatban, amelyeket pl. a nagy- vagy a kisfeszültségű szabadvezetéseken bekövetkezett átíveléseket megszüntető visszakapcsoló automatikák által önműködően elhárított rövid idejű feszültség kimaradások okoznak. Gyakran javasolják a kondenzátorok felszerelését az IEC 831 szerinti kisütő ellenállásokkal, mert ekkor az ellenfeszültségre visszakapcsolás nem jöhet létre. Ugyanakkor a szabvány csak azt írja elő, hogy a feszültség 3 perc alatt 75 V-nál kisebb értékre csökkenjen le, így ennek hatása a néhány száz tíz ms-tól a néhány másodpercig tartó rövid idejű feszültség kimaradásokra csekély.

Ha a kondenzátornak a hálózatra történő visszakapcsolásának pillanatában a kondenzátor maradékfeszültsége éppen megegyezik a hálózati feszültséggel, akkor nincs áramlökés. Ez legalábbis akkor igaz, ha a kompenzátort tisztán kapacitásnak tekintjük, és a hálózatot ideális feszültséggenerátornak, azaz ha feltételezzük, hogy a táphálózat zárlati teljesítménye végtelen. Azonban ha figyelembe vesszük a hálózati reaktanciát, akkor a kapacitásokkal együtt fellépnek bizonyos rezonanciák.

Kondenzátorok torzított hálózaton

Vegyük a következő esetet: a kondenzátor maradékfeszültsége a csúcserték fele, és megegyezik a vonali feszültség pillanatértékével, amely a feszültség utolsó nullaátmenetét követő 45°-ban van, azaz

$$u_C = u\left(\frac{\pi}{4}\right) = 400V \frac{\sqrt{2}}{2} = 283V$$

Ha ugyanebben a feszültség pillanatban csak persze pát másodperccel később visszakapcsolunk, a kondenzátor árama várhatóan a következő lesz:

$$i_C = -\frac{i}{2}$$

Azonban ez nem igaz, mivel a kondenzátor eddig az időpontig le volt választva a hálózatról. A rákapcsolás pillanatában, ha elhanyagolnánk a rendszer induktivitását, az áram rögtön ezt az értéket venné fel, és semmi más nem történne azon kívül, folytatódna tovább az állandósult állapot. A valóságos rendszernek azonban van induktivitása, emiatt az áram csak nulláról indulhat, majd egyre gyorsabban növekszik, és – ismét az induktivitás miatti „tehetetlenség” miatt – majdnem kétszeresével meghaladja az elérni kívánt értéket. Ezt követően elkezdi csökkenni, majd a folyamat így folytatódik tovább egy rövid idejű lengés formájában, amely a hálózatnak a rákapcsolást követő első periódusán belül lecsillapodhat. Az ilyen lengések frekvenciája a hálózat kis induktivitása miatt elég nagy lehet, és zavarhatják a létesítmény berendezéseit. Az áram csak abban az esetben indul lengés nélkül, ha visszakapcsoláskor a hálózati feszültség pillanatértéke, és a kondenzátor maradékfeszültsége a pozitív vagy negatív csúcsertékkal egyenlő, ugyanis ebben a pillanatban az áram pillanatértéke mindenképpen nulla lenne.

Egészen pontosan két feltételnek kell teljesülnie. Először is a kapacitáson és a vele sorosan lévő (szórt vagy az elhangolás miatt beépített) reaktanciákon eső feszültségek összegének meg kell egyeznie a hálózati feszültséggel. Másodszor, az áramnak a már csatlakoztatott kondenzátor esetén várható pillanatértéke meg kell, hogy egyezzen a tényleges árammal, ami a csatlakoztatás pillanatáig természetesen nulla. A második feltétel csak a hálózati feszültség csúcsertéknél teljesül, amelynek viszont meg kell egyeznie a kondenzátor feszültségével. Ennek érdekében a kondenzátort egy kiegészítő tápegység segítségével előzetesen fel kell tölteni. Ennek a megoldásnak van egy kisebb másodlagos előnye is. Mivel a használaton kívüli kondenzátor mindig a lehető legnagyobb mértékben fel van töltve, a benne tárolt energia a rákapcsolás pillanatában segíthet elkerülni a gyors feszültségletörést és az ennek következtében kialakuló villogást.

A relék azonban túl lassúak, és nem lehet őket elegendően pontosan működtetni, hogy a hullámalak adott pontján történjen a kapcsolás. Rélék alkalmazásánál gondoskodni kell a kezdeti áramlökés csillapításáról pl. korlátozó ellenállások vagy előtét fojtótekerccsek beépítésével. Ez utóbbiakat más célokból egyébként is gyakran alkalmazzák (ld. a 3.3.1. alkalmazási segédletet), és néha az áramszolgáltatók is megkövetelik. Bár a soros fojtótekerccs csökkenteni bekapcsoláskor az áramlökést, ezzel szemben kikapcsoláskor feszültségimpulzust okoz. Ez azonban a kisebbik rossz, mivel a fojtótekerccs névleges meddőteljesítménye csak töredéke a kondenzátorénak, így a rendelkezésre álló energia is kevesebb.

Az elektronikus kapcsolók, mint pl. a tirisztorok könnyen vezérelhetők úgy, hogy a kapcsolás pontosan a hullámalak adott pontján menjen végbe. A kapcsolást úgy is lehet szabályozni, hogy a nagy változó induktív terhelések, mint pl. a korábbiakban említett daru motorok, ívkemencék vagy ponthegeztők által okozott gyors villogásokat elkerüljük.

Alternatív megoldás az Európa egyes részein gyakran használt FC/TCR kompenzáció, azaz a tirisztorral szabályozott fojtótekerccsel párhuzamosan kapcsolt állandó értékű kondenzátor.

Központilag vagy egyedileg?

A nagy villamos fogyasztók általában azért végeznek meddőkompenzálást, mert egyes áramszolgáltatók a meddőteljesítmény után is kérnek díjat – nem akkorát, mint a hatásos teljesítmény után, de azért a díj így is számottevő – azaz megfizettetik az elosztórendszer „felesleges használatát”. Egyes országokban a meddőteljesítmény utáni díjszedés hanyatlóban van, és ezért a teljesítménytényező-javítás egyre ritkább. A villamos fogyasztók ezt előnyként könyvelik el, de valójában ez a rendszer terhelését növeli, amely már így is gyakran a legnagyobb terhelhetőségének közelében üzemel.

A hagyományos megközelítés szerint az áramszolgáltatói csatlakozásnál, a közös csatlakozási pontnál helyeznek el egy nagy statikus kompenzátort, amellyel olyan szintre, rendszerint $\cos \varphi = 0.90$ vagy $\cos \varphi = 0.95$ értékre javítják a teljesítménytényezőt, amelyért már nem kell fizetni.

Alternatív megoldásként a kompenzátort az ohmos-induktív terhelések közelében is el lehet helyezni, végső esetben akár közvetlenül az induktív készülék előtt, amelyek így helyben nyelik el a meddőáramokat.

A központi kompenzálást rendszerint olcsóbbnak tartják, mert egy központi egység beszerzési ára kisebb, mint az üzem területén szétszórta elhelyezett, összességében ugyanakkora névleges meddőteljesítmény kompenzálására alkalmas kisebb egység ára. A beépített kompenzáló teljesítmény is kisebb lehet, mivel feltételezhető, hogy minden meddőáram fogyasztó nem működik egyidejűleg. Ugyanakkor emlékeztetni kell arra, hogy a meddőáramok az üzemen belül tényleges veszteséget okoznak – az ohmos elemeken, mint pl. a kábeleken a feszültségesés az árammal azonos fázisban van, így ezek szorzata, azaz a teljesítményvesztés mindig pozitív. A központi kompenzálás ezeket a veszteségeket nem csökkenti, kizárólag az áramszolgáltató által a teljesítménytényező után beszedett díjat mérsékli. Másrészről viszont helyi kompenzálás esetén az egyedi egységek összköltsége nagyobb, mint egy nagy központi egységé, és a teljes beépített kompenzálási teljesítmény is rendszerint nagyobb – minden egyes berendezés saját kompenzátorral rendelkezik, akár működik, akár nem. A veszteségek ugyanakkor csökkennek, mert a meddőáram a fogyasztótól csak a helyi kompenzátorig folyik, és nem a közös csatlakozási pontnál lévő központi kompenzátorig.

A hatékonyságon túl különböző műszaki érvek szólnak a központi kompenzálás mellett és ellen is. Például, ha egy transzformátor együttes terhelése kapacitív jellegű, akkor a fogyasztói oldali feszültség a névleges érték fölé emelkedhet, a primer feszültségtől függően. Ezt a hatást néha a nagy terheléssel üzemelő transzformátorok feszültségesésének csökkentésére használják. A terhelést úgy lehet egyszerűen túlkompenzálni, hogy a transzformátor számára a teljes terhelés kapacitívnak tűnjön, ezzel csökken a transzformátorban az induktív feszültségesés [1]. Azokban az esetekben, amikor a nagy terhelések gyakori kapcsolása villogást okoz, a tirisztorral kapcsolható kompenzáció jobb és megbízhatóbb megoldás, mint a villogás elektronikus kompenzálása, egyúttal sokkal költséghatékonyabb olyan esetekben, amikor a kompenzációra amúgy is szükség van.

Ezzel szemben a transzformátorokon a kapacitív terhelések miatt megjelenő túlfeszültségek általában veszélyesek, amit el kell kerülni, vagy megfelelően kell kezelni, például a névleges feszültséget csak kis mértékben ($\approx 6\%$) meghaladó értékben korlátozni. Néha a kompenzálást középfeszültségen kell vagy célszerű elvégezni, de, ha a középfeszültségű kompenzáció ára nagyobb, mint a kisfeszültségűé, előnyösnek tűnik kisfeszültségű kondenzátorokat alkalmazni oly módon, hogy egy középfeszültségű/kisfeszültségű transzformátoron keresztül csatlakoztatjuk őket. Ilyen esetben a transzformátor terhelése kapacitív lesz, és a kimenő feszültség meghaladja a várt értéket. Ezt a helyzetet az elemek névleges feszültségének vagy a transzformátor áttételének megfelelő megválasztásával, például a fokozatváltó helyes beállításával lehet megoldani. Az utóbbi megoldás előnyösebb, mert nem okozza a transzformátor túlgerjesztését, ami nagyobb veszteségekkel jár együtt. Az elgondolás azonban gazdasági szempontból hibás, mert bár a beruházási költségek kisebbek, de az üzemeltetési költségek nagyobbak lesznek. A meddőáramot az üzemben kétszer alakítják át – az üzem kisfeszültségű hálózatáról a középfeszültségű rendszerre, majd a középfeszültségű rendszerről a kisfeszültségű kondenzátor számára – amely kétszeres veszteséggel jár, és amelyet a fogyasztónak kell megfizetnie.

A meddőteljesítmény másik két hátránya, az átviteli kapacitás igény és a feszültségesés is jelentkezik az üzemen belül minden olyan vonal és transzformátor esetén, amelyek az induktív fogyasztók és a kompenzátor között vannak. Előnyösebb a költségvetés 100%-át 100%-ban hasznos célra fordítani, mint a költségvetés 75%-ának csak az 50%-át.

A helyi kompenzálás keretében minden egyes – még a kis teljesítményű – ohmos-induktív fogyasztókat is beépített kapacitással lehet kompenzálni. Ezt sikeresen megoldották az egy vagy két fénycsövet és mágneses előtéteteket tartalmazó fényforrásokkal kapcsolatban. Németországban és Svájcban ezt a soros kompenzálást gyakran úgy valósítják meg, hogy minden második fénycsőből és előtétből álló áramkört kompenzáció nélkül hagynak, a többi viszont oly módon kompenzálják (túl) egy soros kondenzátorral, hogy pontosan akkora amplitúdójú áramot vegyenek fel, mint a kompenzálás nélküli áramkörök, de a fázisszögük ellentétes legyen.

A decentralizációnak ugyanakkor az aszinkron indukciós gépek egyedi kompenzálásánál korlátai is vannak. Ha a kondenzátort a motor kapcsolója elé tesszük, akkor a motor kikapcsolása után is könnyen a hálózatra kapcsolva maradhat, ezzel túlkompenzálja azt. Ha a kondenzátor a motor kapcsolója után kerül, akkor a motor kikapcsolásával ez is lekapcsolódik a hálózatról, de fennáll az öngerjesztés veszélye a gép lassulása során. Feszültséget, sőt túlfeszültséget akár a hálózattól elszigetelt készülékek is létrehozhatnak, különösen rosszul méretezett kapacitások esetén.

Most már egyértelmű, hogy a meddőteljesítmény nem minden esetben káros. Sőt, ahol az ohmos-induktív fogyasztók vannak túlsúlyban, ott megfelelő nagyságú kapacitív meddőteljesítményre van szükség az induktív meddőteljesítmény ellensúlyozására. A kapacitív meddőteljesítmény például a hálózatra inverter nélkül közvetlenül csatlakozó aszinkron generátorok, mint a szél-erőművek és a kapcsolt energiatermelésű erőművek esetében

is kifejezetten hasznos és csökkenti a veszteséget. Olyan esetekben pedig egyenesen nélkülözhetetlen, amikor ezek a generátorok szigetüzemben működő hálózatot táplálnak, enélkül ugyanis nem lenne gerjesztés, nem lenne feszültség és nem keletkezne villamos energia, hiába forog a gép.

Előtét fojtózás

Az előtét fojtózás azt a gyakorlatot jelenti, amikor minden egyes fázisjavító kondenzátorral egy fojtótekerics van sorba kapcsolva. Az előtét fojtózás egyik célját, a bekapcsolási áramlökécs csillapítását már említettük.

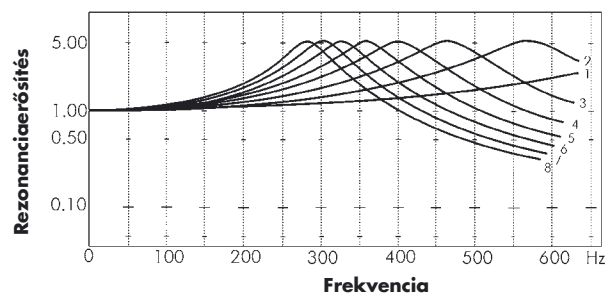
Amiért azonban az összes kompenzátor gyártó és a legtöbb áramszolgáltató alapvetően javasolja az előtét fojtózást – és amiért már sok fogyasztó alkalmazza is – az a hálózaton fellépő feszültségzavarok problémája. A modern elektronikus fogyasztók harmonikus áramokat termelnek, ezzel harmonikus feszültségzavarokat (ld. ezen alkalmazási segédlet 3.1. szakaszát) és nagyfrekvenciás zajokat idézve elő a hálózaton. Mivel a kondenzátor reaktanciája fordítottan arányos a frekvenciával, ezért ezek a nagyfrekvenciák a kondenzátor áramterhelhetőségét meghaladó áramokat hozhatnak létre. Ezt akadályozza meg az előtét fojtótekerics. Az előtét fojtótekerics névleges meddőteljesítménye a fázisjavító kondenzátor meddőteljesítményének általában az 5, 7 vagy 11%-a. Ezt a százalékot *elhangolási tényezőnek* is nevezik.

A névleges értékekkel kapcsolatban általában nagy a bizonytalanság, és nem mindig egyértelmű, hogy a kompenzátor adattábláján feltüntetett meddőteljesítmény a hálózat vagy a kapacitás névleges feszültségére (ez utóbbi a nagyobb) vonatkozik-e, valamint az *elhangolási tényezőt* figyelembe vették-e vagy sem. Valójában a megadott meddőteljesítménynek mindig a teljes egységre (a kompenzátor az előtét fojtótekerics együtt) kell vonatkoznia a névleges hálózati feszültségen és frekvencián.

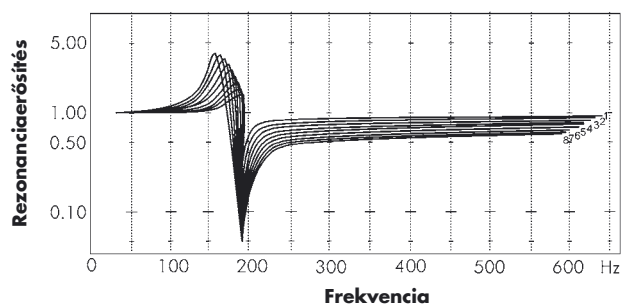
Mivel a fojtótekerics reaktanciája egyenes arányban nő a frekvenciával, a kondenzátoré pedig csökken, ezért az 50 Hz-en 11%-os *elhangolási tényező* 150 Hz-en már közel 100%¹. Ez azt jelenti, hogy az induktív és kapacitív reaktanciák megegyeznek (rezonanciában vannak) és kioltják egymást. Ez ad lehetőséget az *elhangolási tényezők* értékének olyan megválasztására, hogy a hálózatról bizonyos harmonikus elnyomjunk, miközben a fő kompenzáló funkció tökéletesen működik.

Ezt tárgyalja részletesebben a 3.3.1. szakasz. Általában azonban a kondenzátor (és a fojtótekerics) túlterhelésének elkerülése érdekében nem célszerű olyan *elhangolási tényezőt* választani, amely egy meghatározó harmonikus frekvencián rezonanciát okoz. Eszerint az *elhangolási tényezőt* úgy érdemes megválasztani, hogy a kondenzátorból és fojtótekericsből álló összeállítás közvetlenül a fellépő legkisebb harmonikus frekvenciája alatt váljon induktív jellegűvé (9. ábra). Ezzel elkerülhetők a rezonanciák (10. ábra), amelyeket máskülönben valamelyik harmonikus hoz létre a kondenzátor és a rendszer többi eleme, elsősorban a legközelebbi transzformátor szórásai induktivitása között. Az ábrákon az erősítési tényezők láthatók a frekvencia függvényében. Az erősítési tényező ugyanannak a rendszernek a viselkedését fejezi ki a kompenzátor nélküli helyzethez viszonyítva.

Ez azonban nem az egyedüli oka az előtét fojtózásnak. Manapság a kondenzátorok könnyen túlterhelhetők a hálózaton mindenütt jelen lévő, a leggyakoribb harmonikusok frekvenciájánál is nagyobb frekvenciájú zavarokkal. A tápfeszültségre szuperponálódó olyan kis amplitúdójú nagyfrekvenciás feszültségek, amelyek még a jó minőségű hálózat analízátorral készült feszültség görbéken sem láthatók (11. ábra) is nagy áramokat képesek a kondenzátorokon áthajtani.

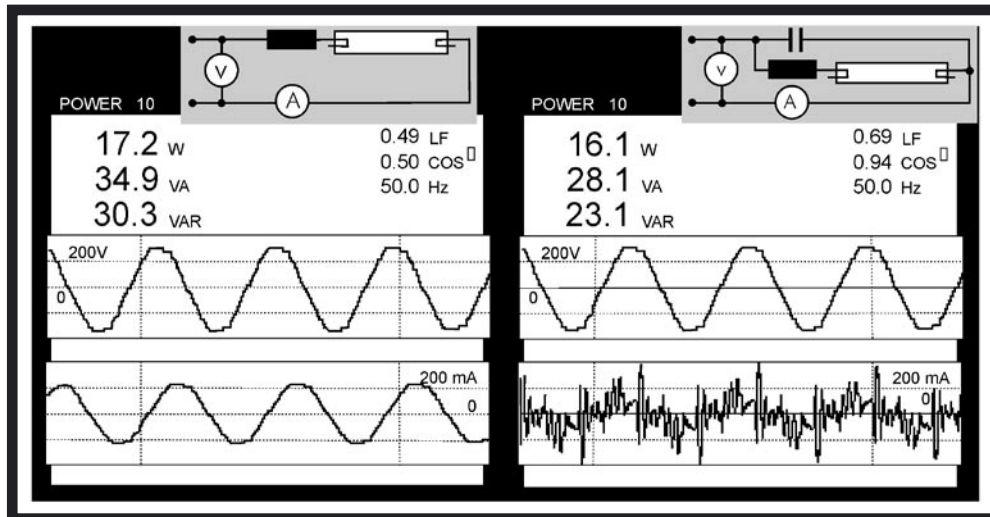


9. ábra: 1250 kVA-es transzformátoron működő, 50 kvar-tól (1. görbe) 400 kvar-ig (8. görbe) terjedő tartományban lévő különböző kompenzátorok



10. ábra: 1250 kVA-es transzformátoron működő, 50 kvar-tól (1. görbe) 400 kvar-ig (8. görbe) terjedő tartományban lévő különböző előtét fojtózott kompenzátorok rezonancia görbéi (Frako)

¹ 50 Hz-en $X_L = 11\%$, így 150 Hz-en $X_L = 33\%$ (az XC 50 Hz-en vett értékéhez viszonyítva). 150 Hz-en $X_C = 33\%$. Mind a kettő nagysága azonos, ezért 100% az „elhangolási tényező”.



11. ábra: 11 W-os fénycső párhuzamos kondenzátorral (jobbra) és anélkül (balra)

A bal oldali ábrán a mágneses előtéttel ellátott 11 W-os fénycső kompenzáció nélkül működik. A nagyon nagy meddőteljesítmény miatt azonban kompenzációra van szükség. A jobb oldali ábrán a sorosan kapcsolt fénycsővet és az előtétet valamint az ezekkel párhuzamosan kapcsolt megfelelő kondenzátort tartalmazó összeállítás árama meglehetősen távol áll a szinuszos hullámalaktól. Az áramban megjelenő nagyfrekvenciás összetevőnek a kondenzátoron kell átfolytania, hiszen más nem változott az áramkörben. A mérések is ezt igazolják. Míg a bal oldali ábrán az áram majdnem tökéletesen szinuszos, és így a teljesítménytényező (LF) és a $\cos \varphi$ (DPF) közötti különbség kicsi, addig a jobb oldali ábrán jelentős. Ennek az az oka, hogy míg a (valódi) teljesítménytényező az (50 Hz-es) hatásos teljesítmény és az alacsonyfrekvenciás meddőteljesítmény, a harmonikusok teljesítményét valamint a zajok teljesítményét magába foglaló látszólagos teljesítmény hányadosa, addig a jó öreg $\cos \varphi$ - a displacement tényező (DPF) – csak a feszültség és az alacsonyfrekvenciás áram közötti fáziseltolásból származó alacsonyfrekvenciás meddőteljesítményt veszi figyelembe. A kondenzátor feladata a meddőáramok vezetése (bal oldali ábra), de ha nincs előtét fojtózva, akkor a harmonikus áramokat is átengedi (jobb oldali ábra). Ez az előtét fojtózás széleskörű elterjedésének a másik oka, amely arra is rávilágít, hogy ez miért olyan fontos az 50 Hz-re méretezett kondenzátorok szempontjából. A kísérletet szinte minden modern hálózaton hasonló eredménnyel lehetne elvégezni. Egyszerűen csak egy kondenzátort kell a vonali feszültségre kapcsolni, és az áram alakulása mindenütt hasonló lesz. Nagyon hatásos, ha a kondenzátor áramát egy megfelelően méretezett hangszórón vezetjük át. A zaj valóban borzasztó, de rögtön lecsendesedik a jellegzetes 50 Hz-es brummra, amint a kondenzátort előtét fojtótekerccsel látjuk el.

Ez a példa arra is rávilágít, hogy a korábbiakban említett, a fénycsőknél alkalmazott soros kompenzáció mennyire előnyös, ahol a kompenzáló kapacitás *elhangolási tényezője* 50%, és ráadásul a fojtótekerccs már rendelkezésre is áll, így nem kell róla külön gondoskodni.

Összefoglalás

A kompenzáció működésének megértéséhez először az L és C elemek egymást kiegészítő viselkedését kell tisztázni. A kompenzáló kondenzátorokat mindig el kell látni előtét fojtótekerccsekkel annak érdekében, hogy elkerüljük a harmonikusok által előidézett rezonanciát és a nagyfrekvenciás áramok által okozott túlterhelést. A változtatható kompenzáló egységeket félvezető kapcsolók és intelligens szabályozó algoritmusok alkalmazásával úgy kell kialakítani, hogy gyors kapcsolásokra legyenek képesek. A cikk tárgyalta a kompenzáció optimális elhelyezését, amely lehet központi és egyedi.

References and Bibliography

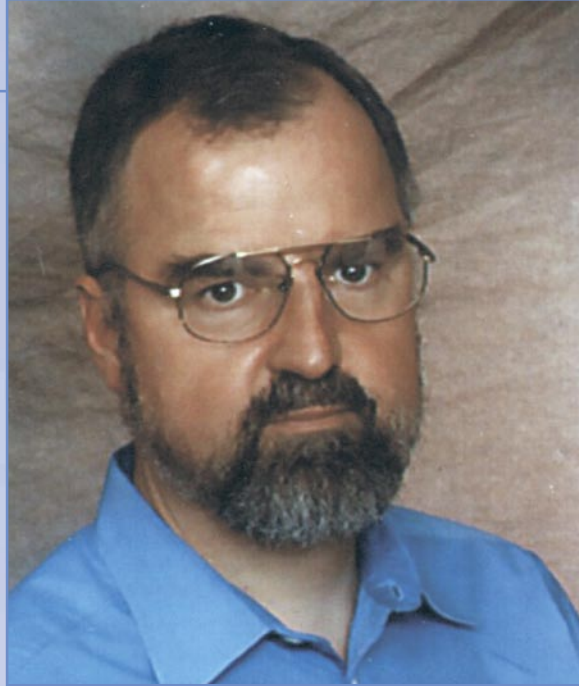
- [1] Wolfgang Hofmann, Wolfgang Just: *Blindleistungs-Kompensation in der Betriebspraxis*, VDE Verlag, Offenbach, Germany, 4th edition, 2003

Referencia és Alapító Tagok*

European Copper Institute* (ECI) <i>www.eurocopper.org</i>	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid <i>www.etsii.upm.es</i>	LEM Instruments <i>www.lem.com</i>
Akademia Gorniczo-Hutnicza (AGH) <i>www.agh.edu.pl</i>	Fluke Europe <i>www.fluke.com</i>	MGE UPS Systems <i>www.mgeups.com</i>
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) <i>www-citcea.upc.es</i>	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) <i>www.htw-saarland.de</i>	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg <i>www.uni-magdeburg.de</i>
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) <i>www.ceiuni.it</i>	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH <i>www.pih.be</i>	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) <i>www.miedz.org.pl</i>
Copper Benelux* <i>www.copperbenelux.org</i>	International Union for Electricity Applications (UIE) <i>www.uie.org</i>	Università di Bergamo* <i>www.unibg.it</i>
Copper Development Association* (CDA UK) <i>www.cda.org.uk</i>	ISR - Universidade de Coimbra <i>www.isr.uc.pt</i>	University of Bath <i>www.bath.ac.uk</i>
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) <i>www.kupferinstitut.de</i>	Istituto Italiano del Rame* (IIR) <i>www.iir.it</i>	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) <i>www.umist.ac.uk</i>
Engineering Consulting & Design* (ECD) <i>www.ecd.it</i>	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) <i>www.kuleuven.ac.be</i>	Wroclaw University of Technology* <i>www.pwr.wroc.pl</i>
EPRI PEAC Corporation <i>www.epri-peac.com</i>	Laborelec <i>www.laborelec.com</i>	

Szerkesztőségi Bizottság

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	LEM Instruments	sho@lem.com
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI PEAC Corporation	mmcgranaghan@epri-peac.com
Dr Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof Dr-Ing Zbigniew Styczyński	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl
Hans van den Brink	Fluke Europe	hans.van.den.brink@fluke.nl



Stefan Fassbinder



Deutsches Kupferinstitut
Am Bonnehof 5
D-40474 Düsseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796300
Fax: 00 49 211 4796310
Email: Sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

Magyar Rézpiaci Központ
H-1053 Budapest,
Képiró u. 9.
Magyarország
Tel: (+36 1) 266 48 10
Fax: (+36 1) 266 48 04
E-mail: info@hcpcinfo.org
Web: www.hcpcinfo.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org