

**BUDAPESTI MŰSZAKI FŐISKOLA
KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI FŐISKOLAI KAR
AUTOMATIKA INTÉZET**

Távoktatás

Badacsonyi Ferenc

TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKA

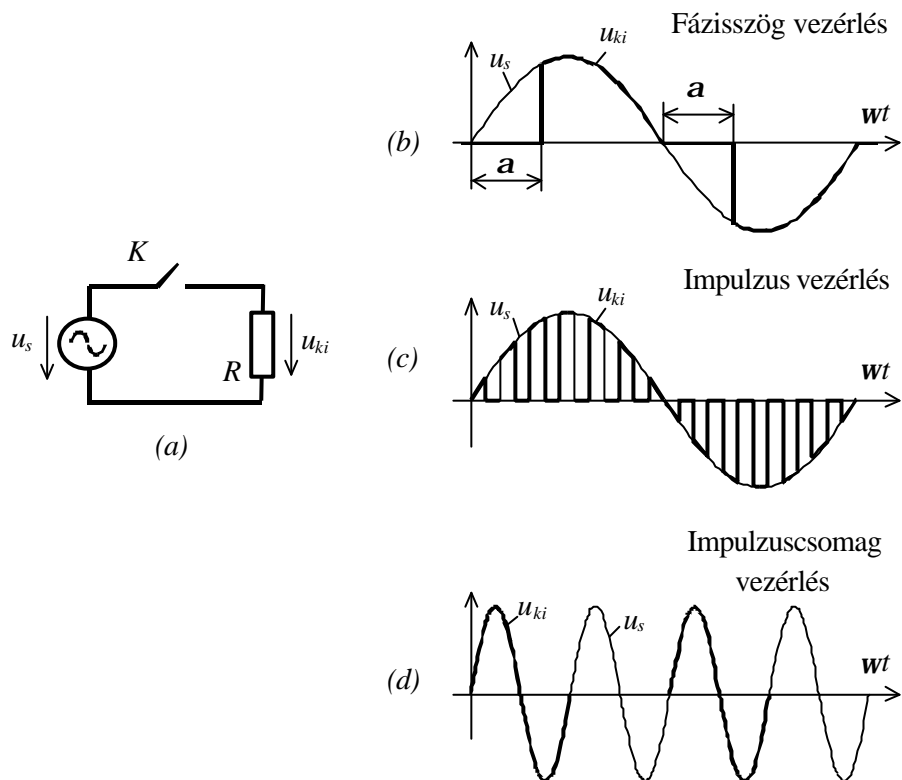
Váltakozóáramú szaggatók

BUDAPEST, 2002.

4. VÁLTAKOZÓÁRAMÚ SZAGGATÓK

4.1. BEVEZETÉS

A váltakozóáramú szaggató kapcsolások célja a szinuszos hálózati frekvenciás feszültség szaggatásával változtatható effektív értékű váltakozófeszültség létrehozása, azaz a váltakozóáramú teljesítményszabályozás. Egyfázisú váltakozóáramú szaggatás szokásos elvi lehetőségeit ohmos terhelésnél a 4.1. ábrán láthatjuk. Ezen elvi lehetőségek természetesen több fázisra és nem csak ohmos terhelésre alkalmazhatók.



4.1. ábra. Egyfázisú váltakozóáramú szaggatás elvi lehetőségei: (a) elvi kapcsolási rajz, (b) fázisszög (vagy fázishasításos)-, (c) impulzus-, (d) impulzuscsomag vezérlés

A 4.1b ábrán látható fázisszög vezérlésű váltakozóáramú szaggatókban hagyományosan ellenpárhuzamosan kapcsolt tirisztorokat, vagy triak-okat alkalmaznak. Ezen elemek vezetését és annak megszűnését alapvetően a bemeneti feszültség irányváltásai, a terhelés jellege és a gyújtási időpontok határozzák meg. A megoldás fő hátránya a kimeneti áram nagy felharmonikus tartalma, illetve a nagy

meddő áram összetevő. Szemmel láthatólag még ohmos terhelés esetén is az alapharmonikus áram fáziskésése összemérhető az \mathbf{a} gyújtáskésleltetéssel.

A 4.1c ábrán látható impulzus vezérlés olyan elemekkel hozható létre, amelyek vezérléssel ki- és bekapcsolhatók. Az előnye az, hogy a kimeneti áram csak kapcsolási frekvenciás és a feletti rendszámú felharmonikusokat tartalmaz. Az alapharmonikus áram fáziskésését a terhelés határozza meg, ohmos terhelésnél nulla. Ez a kapcsolás a kivitelében sokkal bonyolultabb és drágább megoldás a másikkal szemben.

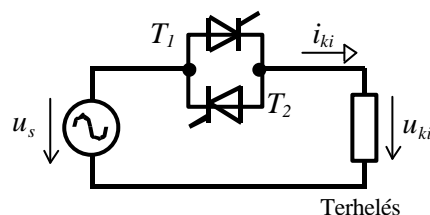
Az 4.1d ábrán látható impulzuscsomag vezérlés nagy időállandójú rendszerek pl. fűtés szabályozásra alkalmazható. A szokásosan alkalmazott kapcsolóelem tirisztorpár vagy triak.

A továbbiakban csak a fázisszög vezérlésű váltakozóáramú szaggatókat vizsgáljuk. Ezen szaggatókat úgy kell kialakítani, hogy a kapcsolóeszközökön fázisonként váltakozóáram folyhasson át és mind a két áramirányt szimmetrikusan lehessen vezérelni. Ehhez fázisonként két tirisztort kell ellenpárhuzamosan kapcsolni, vagy hasonló eredmény érhető el egyetlen triak alkalmazásával is. A tartalmi korlátok miatt nem tárgyaljuk az ellenpárhuzamos tirisztor-dióda párokat tartalmazó féligvezérelt kapcsolásokat, amelyek szintén ipari jelentőséggel bírnak.

A váltakozóáramú szaggatókat a továbbiakban a hálózati kommutációs áramirányítókhoz hasonló feltételekkel és elhanyagolásokkal vizsgáljuk.

4.2. EGYFÁZISÚ VÁLTAKOZÓÁRAMÚ SZAGGATÓK

A 4.2. ábrán látható egyfázisú váltakozóáramú szaggató terhelésén akkor folyik a legnagyobb áram, ha a tirisztorok az áram kialakulását nem korlátozzák, tehát az áramiránynak megfelelően folyamatosan vezetnek. A T_1 tirisztor vezet a pozitív, illetve a T_2 a negatív irányú áramösszetevőket.



4.2. ábra. Egyfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajza

A terhelés áramának effektív értékét úgy lehet csökkenteni, ha a felváltva vezető tirisztorok vezetési idejét korlátozzuk. A megoldás az, hogyha a tápfeszültség irányváltása következtében az egyik tirisztor árama zérusra csökken, a másik tirisztort csak késleltetve gyújtjuk be.

Az ellenpárhuzamosan kapcsolt tirisztorpár miatt mindig igaz, hogy

$$u_{T1} = -u_{T2}. \quad (4.1)$$

Nullától eltérő kimeneti áram esetén a vezető tirisztoron legfeljebb néhány volt nagyságú feszültségesés mérhető, illetve az ellenpárhuzamosan kapcsolt tirisztoron ugyanez a feszültség záróirányban jelenik meg.

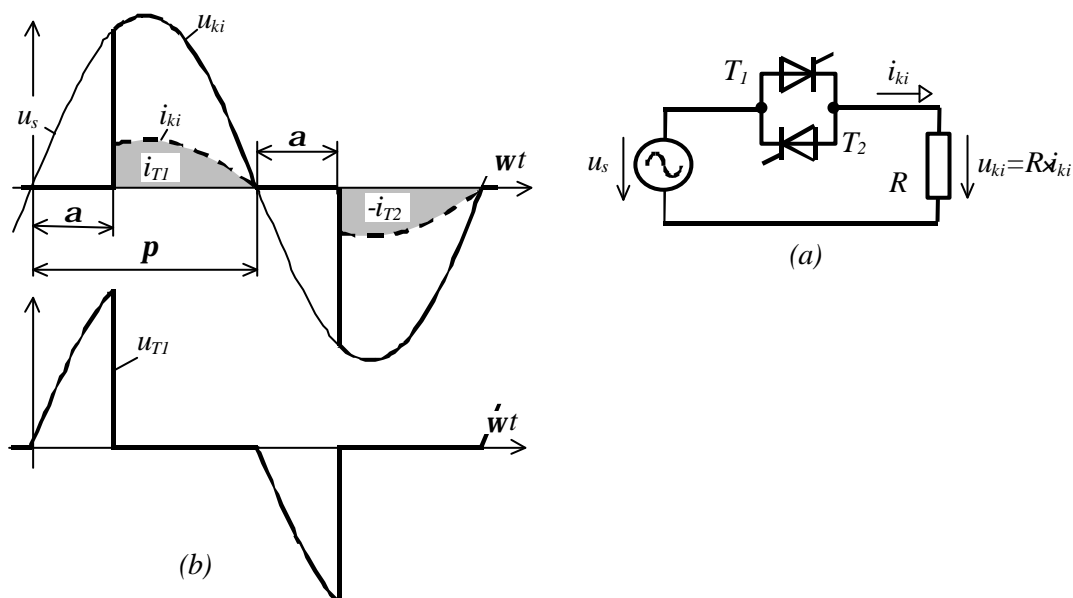
Amennyiben a kimeneti áram nulla, R vagy soros $R + L$ terhelés esetén

$$u_{T1} = -u_{T2} = u_s, \quad (4.2)$$

tehát a T_1 tirisztor begyújtható, ha a fázisfeszültség pillanatértéke pozitív, illetve a T_2 -re mindez ellentétes polaritással igaz. Ennek megfelelően a T_1 tirisztor α gyújtáskésleltetését az u_s tápfeszültség pozitív-, míg T_2 -ét a negatív nulla átmenettől mérjük.

4.2.1. Ohmos terhelés

A 4.3. ábrán egy ohmos terhelésű egyfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajzát és időfüggvényeit láthatjuk. Ha u_s pozitív irányú, a T_1 tirisztor vezethet, ha az $\dot{u}t = \alpha$ pillanatban vezérlőjelet adunk rá. A T_1 begyújtását követően u_{ki} megegyezik u_s -el. Az ohmos terhelés miatt $u_{ki} = R \dot{i}_{ki}$, tehát u_{ki} és i_{ki} arányosak. Az u_s soron következő nulla átmenetében $\alpha_k = \mathbf{p}$ kialvási szögnél i_{ki} nulla lesz, és az addig vezető tirisztor árama megszakad. Ha u_s negatív irányú, a T_2 tirisztor vezethet, ha az $\dot{u}t = \alpha + \mathbf{p}$ pillanatban vezérlőjelet adunk rá. A T_2 tirisztor begyújtását követően, a második félperiódusban, a kimenetre kapcsolódó u_s feszültség és ezáltal az i_{ki} áram



4.3. ábra. Ohmos terhelésű egyfázisú váltakozóáramú szaggató:

(a) kapcsolási rajza, (b) időfüggvényei

alakja is az előző félperiódus mínusz egyszerese. A kimeneti áram csak az $\mathbf{a}=0$ alsó határnál folyamatos, minden más esetben szaggatott. A gyújtáskésleltetés felső határa $\mathbf{a}=\mathbf{p}$.

A származtatott mennyiségek a 4.3. ábra időfüggvényei alapján számíthatók ki.

Az effektív értékek:

$$U_{kiRMS} = \left\{ \frac{1}{\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{p}} [\sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w})]^2 d\mathbf{w} \right\}^{1/2} = U_s \left\{ \frac{1}{\mathbf{p}} \left[\mathbf{p} - \mathbf{a} + \frac{\sin(2\mathbf{a})}{2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (4.3)$$

ahol U_s a szinuszos tápfeszültség effektív értéke. Ohmos terhelésnél értelemszerűen:

$$I_{kiRMS} = \frac{U_{kiRMS}}{R}, \quad (4.4)$$

amelyből a tirisztorokra:

$$I_{TRMS} = I_{kiRMS} / \sqrt{2}. \quad (4.5)$$

A tirisztor áramok I_T középértéke:

$$I_T = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{p}} \frac{\sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w})}{R} d\mathbf{w} = \frac{\sqrt{2}}{\mathbf{p}} \cdot \frac{U_s}{R} \cdot \frac{1 + \cos \mathbf{a}}{2} \approx 0.45 \cdot \frac{U_s}{R} \cdot \frac{1 + \cos \mathbf{a}}{2}, \quad (4.6)$$

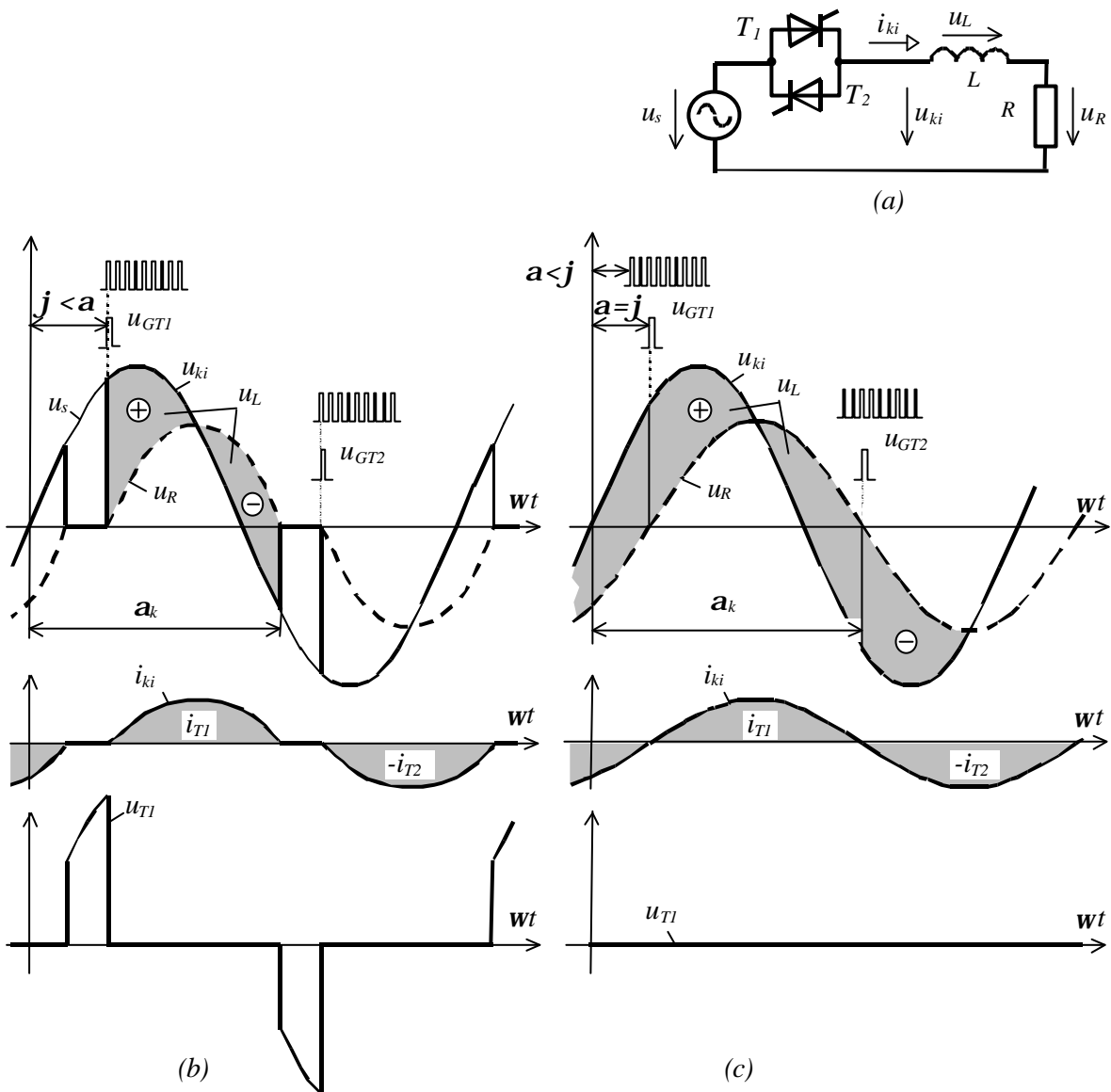
A fenti mennyiségek nagysága folyamatosan változtatható az $\mathbf{a}=0$ -hoz tartozó maximumtól az $\mathbf{a}=\mathbf{p}$ -hez tartozó nulla szintig.

4.2.2. Soros $R+L$ terhelés

A 4.4. ábrán egy soros $R+L$ terhelésű egyfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajzát és időfüggvényeit láthatjuk. Mivel bármelyik tirisztor vezetése esetén u_{ki} megegyezik u_s -el, az induktivitás feszültsége mint az $u_L = u_{ki} - u_R$ metszék olvasható le. Amint látni fogjuk, szaggatott és folyamatos kimeneti áramú üzemmód egyaránt elérhető az \mathbf{a} gyújtásszög és a terhelés \mathbf{j} fázisszögének viszonyától és az $\mathbf{a} < \mathbf{j}$ vezérlési tartományban a gyújtójel szélességétől függően.

Mivel itt a T_1 és T_2 tirisztorok időben eltolva, a tápfeszültség ellentétes alakú szakaszait kapcsolják a kimenetre, a soros $R+L$ terhelés szinuszos tápfeszültségre történő bekapcsolási tranzienseinek kimeneti jelei is egymás mínusz egyszeresei lesznek a két félperiódusban. Ezt figyelembe véve, egy-egy kapcsolási tranziensre érvényesek az egyfázisú hálózati kommutációs áramirányítóknál leírtak. Ennek megfelelően az \mathbf{a}_k kialvási szög meghatározására a 3. fejezetben ismertetett iterációs formula vagy a kialvási jelleggörbék alkalmazhatók. A váltakozóáramú tranziensek elmélete szerint a szaggatott kimeneti áram feltétele a $\mathbf{j} < \mathbf{a}$ gyújtásszög, mivel ekkor egy áramhullám rövidebb, mint \mathbf{p} , tehát megszakad a másik tirisz-

tor gyújtása előtt (4.4b ábra). A folyamatos kimeneti áram feltétele az $\alpha = \beta$ gyújtásszög, vagy széles gyújtójel (vagy impulzus sorozat) esetén az $\alpha \leq \beta$ gyújtásszög is, mivel ezekben az esetekben a tirisztorpár rövidzárként szolgálja ki a szinuszos áram természetes irányváltásait (4.4c ábra). Utóbbi esetben az áram β fázisszögnek megfelelő természetes nulla átmenete előtt a gyújtás még hatástalan, mivel a másik tirisztor vezetése kis értékű, de negatív feszültséget kényszerít a nem vezető tirisztorra. A széles gyújtóimpulzus csak abban a pillanatban válik hatásossá, amikor az áram a korábban vezető tirisztoron a feszültség nulla átmenet után β fázisszöggel megszakad, tehát itt is látszólagosan $\alpha = \beta$ gyújtásszögnek megfelelő jelekkel kell számolni.



4.4. ábra. Soros $R + L$ terhelésű egyfázisú váltakozóáramú szaggató: (a) kapcsolási rajza, és időfüggvényei: (b) szaggatott, (c) folyamatos vezetés esetén

A származtatott mennyiségek közül a kimeneti feszültség effektív értéke, illetve a tirisztor áramok középértéke normál váltakozóáramú működés esetén a 4.4. ábra alapján:

$$U_{kiRMS} = \left\{ \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{a}_k} [\sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w})]^2 d\mathbf{w} \right\}^{1/2} = U_s \left\{ \frac{1}{2\mathbf{p}} \left[\mathbf{a}_k - \mathbf{a} + \frac{\sin(2\mathbf{a}) - \sin(2\mathbf{a}_k)}{2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (4.7)$$

Egy tirisztor áramának középértéke felhasználva, hogy u_L középértéke állandósult állapotban nulla és a tirisztorok vezetése alatt $u_R = u_s - u_L$:

$$I_T = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{a}_k} \frac{u_R}{R} d\mathbf{w} = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{a}_k} \frac{\sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w}) - u_L}{R} d\mathbf{w} \approx 0.45 \cdot \frac{U_s}{R} \cdot \frac{\cos \mathbf{a} - \cos \mathbf{a}_k}{2} \quad (4.8)$$

Folyamatos vezetésnél a szabályos szinuszos kimeneti feszültség effektív értéke megegyezik a tápfeszültség effektív értékével:

$$U_{kiRMS} = U_s, \quad (4.9)$$

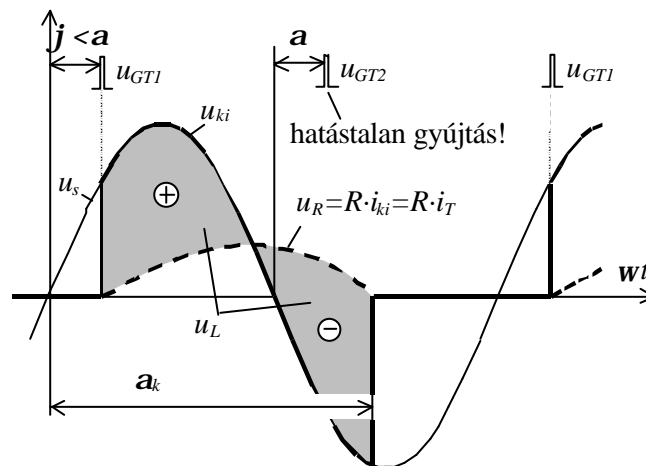
amelyből a kimeneti áram, illetve egy tirisztor áramának effektív értéke:

$$I_{kiRMS} = \frac{U_s}{Z}, \quad I_{TRMS} = \frac{I_{kiRMS}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_s}{Z}, \quad (4.10)$$

ahol Z a terhelés váltakozóáramú impedanciája.

Egy tirisztor áramának középértéke folyamatos vezetésnél, amikor pl. a T_1 tirisztor árama egy olyan szabályos szinuszos félhullám, amelynek a pozitív nulla átmenete $\dot{u}t = \mathbf{j}$ -nél van:

$$I_T = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{j}}^{\mathbf{j}+\mathbf{p}} \frac{\sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w} - \mathbf{j})}{Z} d\mathbf{w} = \frac{\sqrt{2}}{\mathbf{p}} \cdot \frac{U_s}{Z} \approx 0.45 \cdot \frac{U_s}{Z} \quad (4.11)$$



4.5. ábra. Soros $R + L$ terhelésű egyfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei, $\mathbf{a} < \mathbf{j}$ és keskeny gyújtójelnél, ha csak T_1 üzemel

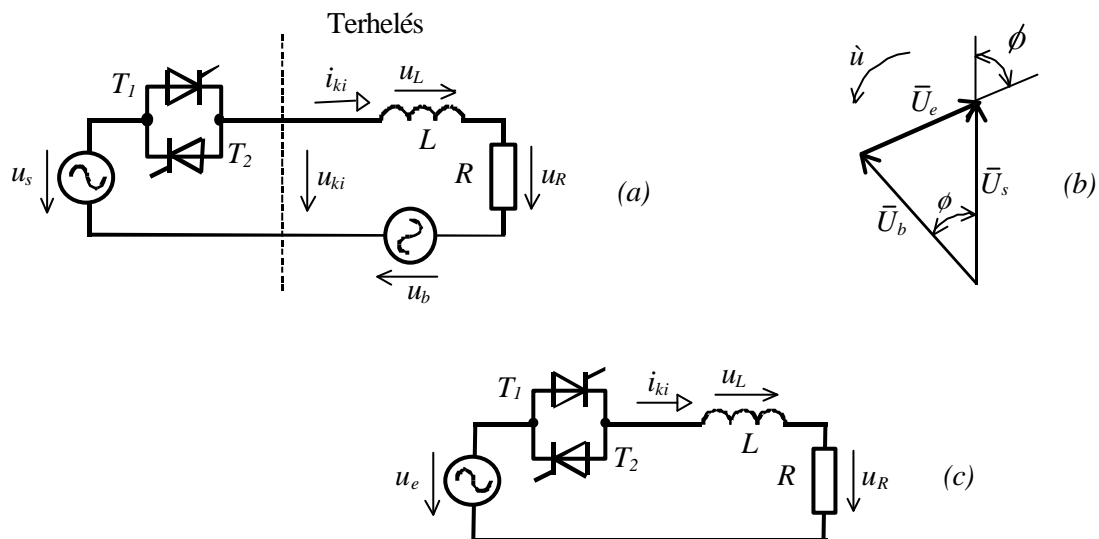
A szaggató kiesik a normál váltakozóáramú üzemmódból, ha keskeny gyújtójelnél az $\mathbf{a} < \mathbf{j}$ -tartományba vezéreljük. Ebben az esetben az elsőként begyűjtött tirisztoron \mathbf{p} -nél szélesebb áramimpulzus alakul ki és mivel a feszültségesése záróirányban jut a másik tirisztorra, annak begyűjtését megakadályozza. Amennyiben csak egyetlen tirisztor üzemel, a kapcsolás egyenirányítóként viselkedik. A vonatkozó időfüggvényeket a 4.5. ábra mutatja a T_2 kiesése esetén.

4.2.3. Belső feszültséget tartalmazó terhelés

Amennyiben az R vagy soros $R+L$ terhelés mellé a tápfeszültséggel azonos frekvenciájú szinuszos u_b belső feszültségforrás is kapcsolódik, az áramkör analízisét visszavezethetjük az egyszerű R , illetve soros $R+L$ terhelésre, ha a két forrást az

$$u_e = u_s - u_b \quad (4.12)$$

soros eredőjével helyettesítjük (4.6. ábra).



4.6. ábra. Egyfázisú váltakozóáramú szaggató: (a) kapcsolási rajza soros $R+L+u_b$ terheléssel, (b) a forrásfeszültségek vektorábrája, (c) helyettesítő kapcsolása u_e eredő feszültségforrással

Ha a feszültségforrások időfüggvényei:

$$u_s = \sqrt{2}U_s \sin(\mathbf{w}),$$

$$u_b = \sqrt{2}U_b \sin(\mathbf{w} + \mathbf{y}), \quad (4.13)$$

az eredő feszültségforrás időfüggvénye a 4.6b vektorábra alapján:

$$u_e = \sqrt{2}U_e \sin(\mathbf{w} - \mathbf{f}), \quad (4.14)$$

ahol

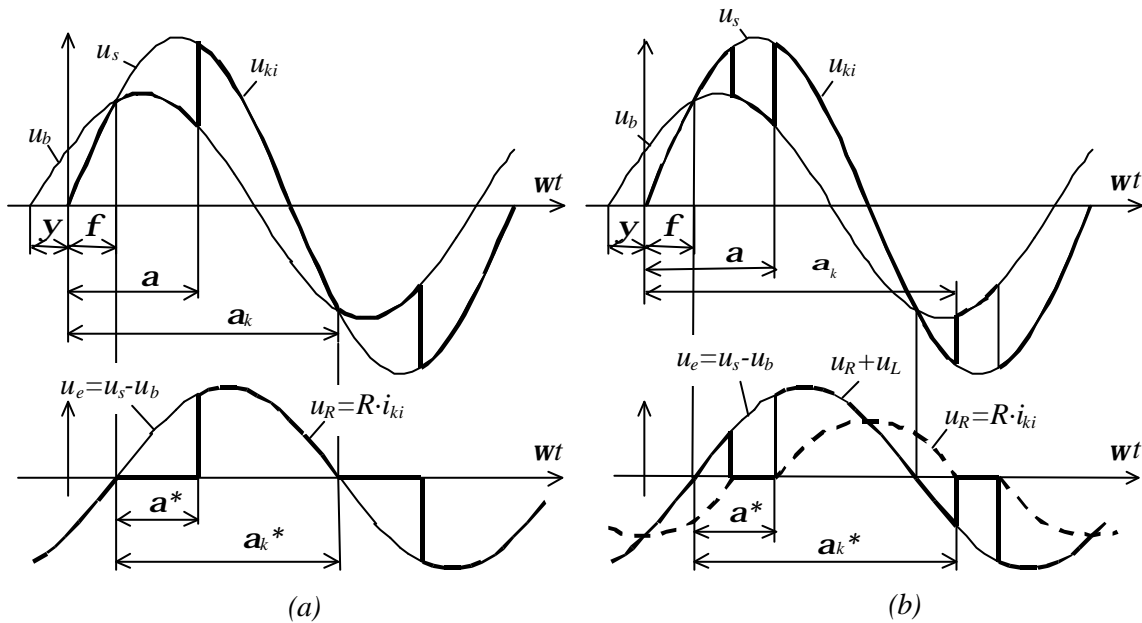
$$U_e = \sqrt{(U_s - U_b \cos(\mathbf{y}))^2 + (U_b \sin(\mathbf{y}))^2},$$

$$\mathbf{f} = \arctg \frac{U_b \sin(\mathbf{y})}{U_s - U_b \cos(\mathbf{y})}. \quad (4.15)$$

Az egyszerű R , illetve soros $R+L$ terhelésű váltakozóáramú szaggatóként végrehajtott analízishez természetesen át kell térni a helyettesítő u_e forráshoz viszonyított \mathbf{a}^* gyújtás- és az \mathbf{a}_k^* kialvási szögekre, ahol

$$\mathbf{a}^* = \mathbf{a} - \mathbf{f} \text{ és } \mathbf{a}_k^* = \mathbf{a}_k - \mathbf{f}. \quad (4.16)$$

A vonatkozó időfüggvényeket a 4.7. ábrán láthatjuk, ahol a helyettesítő kapcsolás időfüggvényei (alsó ábrák) értelemszerűen analóg módon értelmezhetők a 4.3. és 4.4. ábrák jeleivel. A kimeneti árammal arányos $u_R = R \cdot i_{ki}$ görbe mutatja az áramvezetés időszakait. Az áramvezetés időtartamaiban a passzív R , illetve a soros $R+L$ elemekre az $u_e = u_s - u_b$ helyettesítő forrásfeszültség, illetve az áram megszakadása esetén nulla feszültség jut. Az u_b belső feszültségforrást is tartalmazó teljes terhelésre az áramvezetés időtartamaiban 4.6a ábra kapcsolási rajza alapján $u_{ki} = u_s$, illetve nulla kimeneti áramnál $u_{ki} = u_b$ feszültség kapcsolódik.



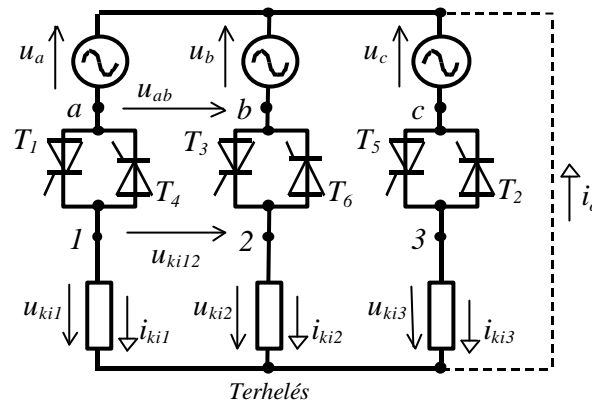
4.7. ábra. Egyfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei:

(a) soros $R + u_b$ terheléssel, (b) soros $R + L + u_b$ terheléssel

4.3. HÁROMFÁZISÚ VÁLTAKOZÓÁRAMÚ SZAGGATÓK

Nagyobb teljesítményigénynél vagy, ha maga a felhasználás változtatható effektív értékű háromfázisú váltakozó feszültséget igényel, háromfázisú váltakozóáramú szaggatót alkalmaznak. Ilyen felhasználás pl. a háromfázisú aszinkron motorok lágy indítása. A terhelés és a vezérlés többnyire mind a három fázisban szimmetrikus.

A vizsgált háromfázisú kapcsolást a 4.8. ábrán láthatjuk. A csillagpontokat összekötő szaggatott vonallal jelölt nullavezető alkalmazása, vagy elhagyása szerint kétféle kapcsolást különböztetünk meg. A belső feszültséget is tartalmazó terhelést nem tárgyaljuk, de alkalmazásánál az egyfázisú esethez hasonlóan vonhatók össze egy-egy fázisban a feszültségforrások.



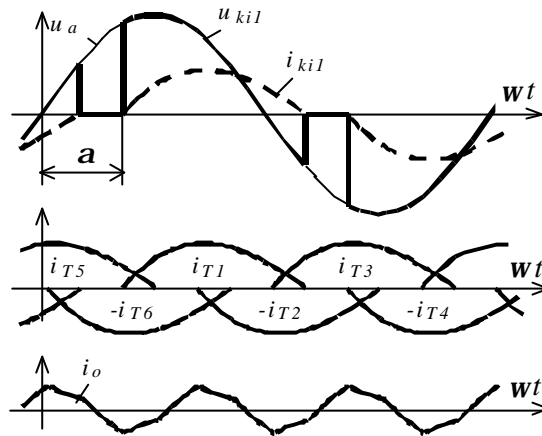
4.8. ábra. Háromfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajza

A kapcsolás és a vezérlés háromfázisú szimmetriája esetén az egyes fázisok jelei között $2\pi/3$ nagyságú fáziseltolás van. A háromfázisú szimmetrikus vezérlés szerint az egyes fázisok azonos irányban vezető tirisztorainak gyújtásai között $2\pi/3$ nagyságú fáziseltolás, illetve az ellenpárhuzamos tirisztorpárok elemei között π fáziseltolás alkalmazandó. Ennek megfelelően a kapcsolási rajzon látható sorszámok szerint $\pi/3$ szögenként követik egymást a T_1, T_2, T_3, \dots tirisztorok gyújtásai. A tirisztorok a gyújtáskésleltetését a kapcsolódó fázisfeszültségek pozitív, illetve negatív nulla átmeneteitől mérjük.

4.3.1. Háromfázisú váltakozóáramú szaggató nullavezetővel

Egy háromfázisú váltakozóáramú szaggató nullavezetővel kiegészítve három független egyfázisú szaggatóként tárgyalható, figyelembe véve az egyes fázisok jelei közötti $2\pi/3$ nagyságú fáziseltolást. Ennek megfelelően fázisonként soros $R+L$ terhelés és szaggatott vezetés esetén a fázisok jelei analóg módon rajzolhatók fel az egyfázisú váltakozóáramú szaggató 4.4b ábrán látható görbéivel. Ennek megfelelő, az „a” fázishoz tartozó áram és feszültség időfüggvények a 4.9. ábra felső részén

láthatók. A középső ábrarészleten, figyelembe véve a fáziseltolásokat, együtt látható mind a három fázisáram (bejelölve az összes tirisztor árama is). A legalsó ábrarészleten látható nullavezető árama, a csomóponti törvény alapján a három fázisáram $i_o = i_{ki1} + i_{ki2} + i_{ki3}$ összegeként képezhető. A nullavezetőn a feszültségforrások frekvenciájához képest háromszoros alapharmonikus frekvenciájú áram folyik, leszámítva a fázisok folyamatos áramvezetésének esetét, amikor $i_o = 0$. Levezetés nélkül, szimmetrikus ellenállás terhelés és például $\alpha = \pi/2$ gyújtásszög mellett a nullavezető áramának effektív értéke éppen akkora, mint a legnagyobb fázisáram effektív értéke. E hátrányos tulajdonságai miatt a nullavezető alkalmazását általában kerüljük.



4.9. ábra. Nullavezető háromfázisú, váltakozó áramú szaggató időfüggvényei, soros $R + L$ terhelés

4.3.2. Háromfázisú váltakozóáramú szaggató, nullavezető nélkül

Ez a leggyakrabban alkalmazott háromfázisú, váltakozóáramú szaggató kapcsolás. Teljes kivezérléskor (tehát ha legnagyobb az áram) az egyes tirisztorpárok a fázisfeszültség és a terhelés impedanciájának hányadosával meghatározott nagyságú szinuszos áram folyik. Mivel nullavezető nincs, az áramvezetéshez legalább két fázis együttes vezetése szükséges.

Nullavezető nélkül, a terhelés csillagpontjának feszültsége a Millmann tétel szerint számítható ki. Ennek értéke szimmetrikus háromfázisú R, L vagy soros $R+L$ terhelés esetén a vezető fázisok forrás feszültségeinek számtani közepe a források csillagpontjához képest. A terhelés csillagpontjának és a források feszültségeinek ismeretében közvetlenül felírhatók a terhelések fázisfeszültségei vagy a tirisztorfeszültségek. Ha minden fázis vezet, vagy nem vezet egy fázis sem (ebben az esetben szimmetrikus tirisztorokat feltételezve), a terhelés és a tápforrások csillagpontjainak potenciálja azonos.

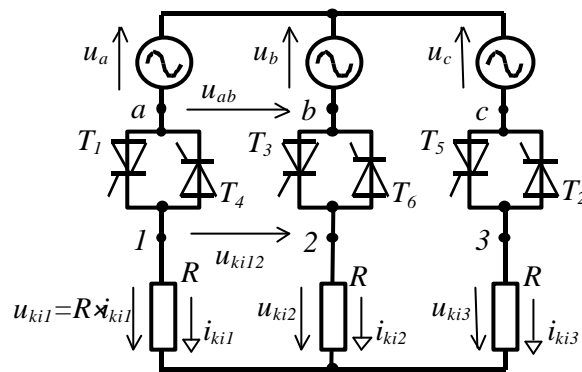
A szaggató számára egyenértékű csillag- vagy delta- kapcsolású terhelések a villamosságatan szabályai szerint számíthatók át. Passzív szimmetrikus háromfázisú terhelések esetén a fázis impedanciák kapcsolata:

$$Z_{fY} = 3Z_{fD} . \quad (4.17)$$

Az átszámíthatóság miatt csak a csillag kapcsolású terhelést vizsgáljuk.

4.3.2.1. Ohmos terhelés

A 4.10. ábrán látható ohmos terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggatónál három jellemző vezérlési tartomány különböztethető meg, attól függően, hogy milyen vezetési állapotok alakulhatnak ki az áramkörben.

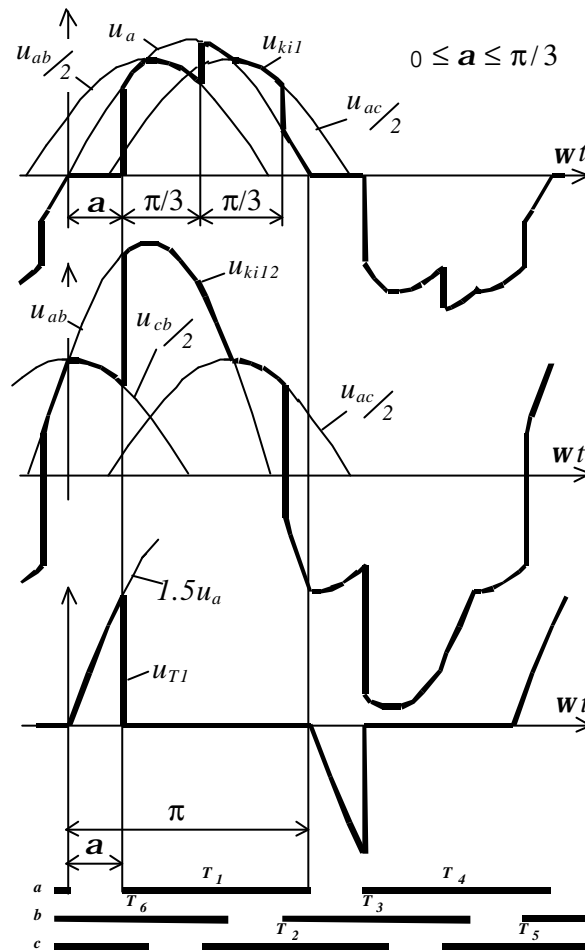


4.10. ábra. R_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajza

$0 \leq \alpha \leq \pi/3$ tartomány:

Az első vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.11. ábrán láthatók. Itt minden gyújtást követően először mind a három fázis vezet, tehát az összes ellenállásra a saját fázisának tápfeszültsége jut (pl. $u_{ki1} = u_a$). Mivel a fázisáramok és feszültségek arányosak, a legközelebbi fázisfeszültség nulla átmenetben lezár az adott fázis áramát vezető tirisztor és csak két fázis vezet tovább a következő tirisztor gyújtásáig. Ekkor a vezető fázisok azonos értékű ellenállásaira a kapcsolódó vonali feszültség fele jut. Pl. az „a” és „b” fázisok vezetése esetén (ha T_1 és T_6 vagy T_4 és T_3 vezetnek) $u_{ki1} = u_{ab}/2$, illetve az „a” és „c” fázisok vezetése esetén (ha T_1 és T_2 vagy T_4 és T_5 vezetnek) $u_{ki1} = u_{ac}/2$. A terhelés u_{ki12} vonali feszültsége $u_{ki12} = u_{ab}$, ha vezetnek az „a” és „b” fázisok, függetlenül a „c” fázis vezetésétől. Ha csak az „a” és „c” fázisok vezetnek $u_{ki12} = u_{ki1} = u_{ac}/2$, mivel $u_{ki2} = 0$. Ha csak a „b” és „c” fázisok vezetnek $u_{ki12} = -u_{ki2} = u_{cb}/2$, mivel $u_{ki1} = 0$. Utóbbi esetben a terhelés csillagpontjának po-

tenciálja a tápforrások csillagpontjához képest a Millmann tétel szerint $(u_b + u_c)/2 = -u_a/2$. Mivel ez a potenciál jelenik meg a T_1 katódján is és ugyanakkor a T_1 anódjára az u_a kapcsolódik, a T_1 tirisztor feszültsége $u_{T1} = 1.5 \cdot u_a$.



4.11. ábra. R_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szagató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái a $0 \leq a \leq \pi/3$ tartományban

A terhelés fázis- és vonali-, illetve a tirisztorok feszültségeinek az *adott vezetési állapothoz tartozó*, fentiekben meghatározott összefüggései általános érvényűek a szimmetrikus háromfázisú R, L vagy soros $R+L$ terheléseknél. Összefoglalva:

- Ha nem vezet egy fázis sem: $u_{ki1} = 0$; $u_{ki12} = 0$; $u_{T1} = u_a$
- Ha minden fázis vezet: $u_{ki1} = u_a$; $u_{ki12} = u_{ab}$; $u_{T1} = 0$
- Ha az „a” és „b” vezet: $u_{ki1} = u_{ab}/2$; $u_{ki12} = u_{ab}$; $u_{T1} = 0$
- Ha az „a” és „c” vezet: $u_{ki1} = u_{ac}/2$; $u_{ki12} = u_{ac}/2$; $u_{T1} = 0$
- Ha az „b” és „c” vezet: $u_{ki1} = 0$; $u_{ki12} = u_{cb}/2$; $u_{T1} = 1.5 \cdot u_a$ (4.18)

A többi fázisra és tirisztorra analóg módon írhatók fel az összefüggések. A táblázat azt a vezetési állapotot is tartalmazza, amikor nem vezet egy fázis sem. Ekkor egy tirisztorra a saját fázisának tápfeszültsége, vagy annak mínusz egyszerese jut.

A 4.11. ábra időfüggvényei alapján a terhelés fázisfeszültsége (és árama) a gyújtást követően a szinuszos jeltől azonos területű szakaszokkal tér el pozitív és negatív irányban. Ennek megfelelően egy tirisztor áramának középértéke:

$$I_T = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{p}} \frac{u_a}{R} d\mathbf{w} = \frac{\sqrt{2}}{\mathbf{p}} \cdot \frac{U_s}{R} \cdot \frac{1 + \cos(\mathbf{a})}{2} \approx 0.45 \cdot \frac{U_s}{R} \cdot \frac{1 + \cos(\mathbf{a})}{2}. \quad (4.19)$$

ahol $u_a = \sqrt{2} \cdot U_s \sin(\mathbf{w})$ és ezen belül U_s a fázisfeszültség effektív értéke.

A kimeneti fázisfeszültség effektív értéke az u_{ki1}^2 görbe szakaszonkénti integráljának képzésével:

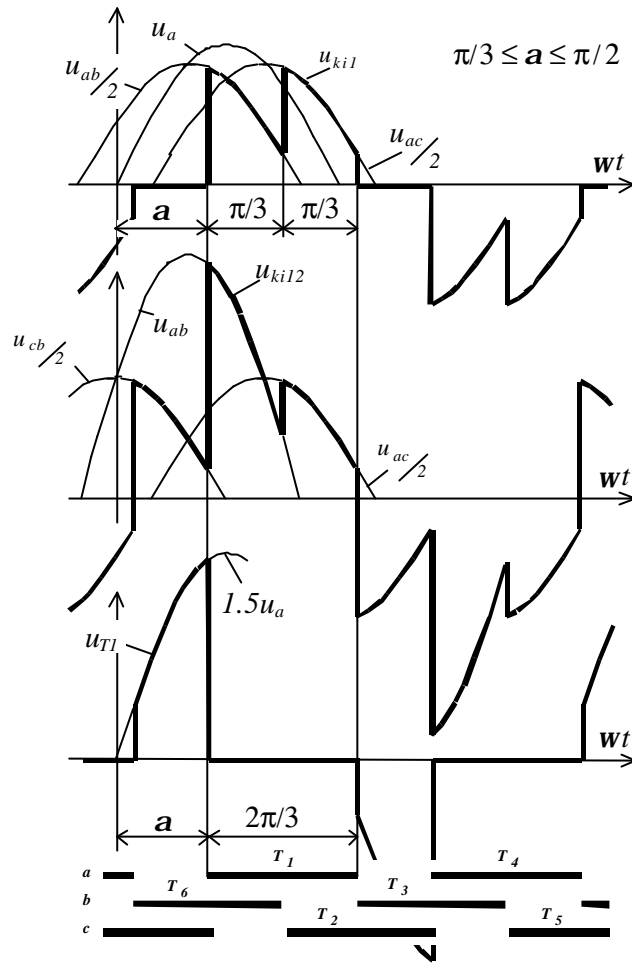
$$U_{ki1RMS}^2 = \frac{1}{\mathbf{p}} \left\{ \int_{\mathbf{a}}^{\mathbf{p}/3} u_a^2 d\mathbf{w} + \int_{\mathbf{a}+\mathbf{p}/3}^{2\mathbf{p}/3} u_a^2 d\mathbf{w} + \int_{\mathbf{a}+2\mathbf{p}/3}^{\mathbf{p}} u_a^2 d\mathbf{w} + \int_{\mathbf{p}/3}^{\mathbf{a}+\mathbf{p}/3} \left(\frac{u_{ab}}{2} \right)^2 d\mathbf{w} + \int_{2\mathbf{p}/3}^{\mathbf{a}+2\mathbf{p}/3} \left(\frac{u_{ac}}{2} \right)^2 d\mathbf{w} \right\}, \quad (4.20)$$

ahol $u_{ab} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_s \sin(\mathbf{w} + \mathbf{p}/6)$, $u_{ac} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_s \sin(\mathbf{w} - \mathbf{p}/6)$. Elvégezve az integrálásokat a végeredmény:

$$U_{ki1RMS} = U_s \left\{ 1 - \frac{3\mathbf{a}}{2\mathbf{p}} + \frac{3}{4\mathbf{p}} \sin(2\mathbf{a}) \right\}^{1/2}. \quad (4.21)$$

$\pi/3 \leq \mathbf{a} \leq \pi/2$ tartomány:

A második vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.12. ábrán láthatók. Itt egy-egy tirisztor begyújtásának következtében egy másik fázishoz tartozó és előzőleg vezető tirisztoron megszűnik az áram. A vezetési sémából is láthatóan gyújtástól-gyújtásig, $\pi/3$ tartományonként változva kettő-kettő fázis vezet, tehát u_{ki1} a vezetési állapottól függően a (4.18) szerinti fél vonali vagy nulla feszültséggel egyezik meg. A tirisztorok lezárásának magyarázatához tételezzük fel, hogy egy tirisztor begyújtását követően pillanatszerűen mind a három fázis vezet. Ekkor a Millmann tétel szerint az összes ellenállásra a saját fázisának tápfeszültsége jut. Megállapítható, hogy a tápfeszültségek pillanatértéke szerint ebben a vezérlési tartományban a begyújtott tirisztorral korábban azonos irányban vezető tirisztor árama irányt váltana, tehát ez a tirisztor lezár. Ennek megfelelően egy tirisztor a bekapcsolását követően $2\pi/3$ tartományban vezet áramot, összhangban a 4.12. ábrán látható vezetési sémával. Az u_{ki12} vonali- és az u_{T1} tirisztorfeszültség szintén a (4.18) szerint határozható meg a vezetési állapot függvényében.



4.12. ábra. R_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái a $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi/2$ tartományban

A 4.12. ábra időfüggvényei alapján egy tirisztor áramának középértéke:

$$I_T = \frac{2}{2p} \int_a^{a+p/3} \frac{u_{ab}}{2 \cdot R} d\omega = \frac{\sqrt{6}U_s}{2p \cdot R} \sin\left(a + \frac{p}{3}\right), \quad (4.22)$$

illetve a kimeneti fázisfeszültség effektív értéke az u_{ki1}^2 görbe integrálásával:

$$U_{ki1RMS}^2 = \frac{2}{p} \int_a^{a+p/3} \left(\frac{u_{ab}}{2}\right)^2 d\omega, \quad (4.23)$$

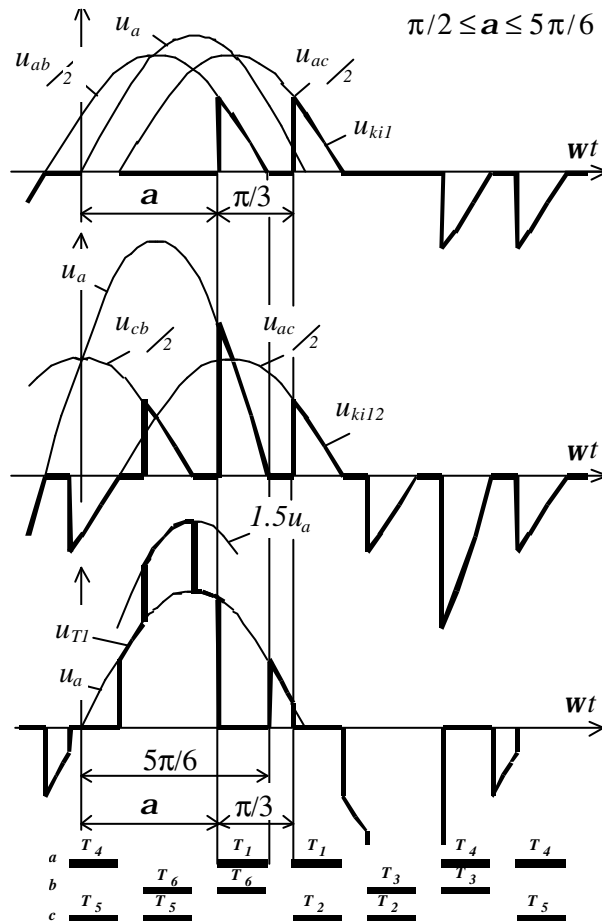
amelyből az integrálás elvégzésével a végeredmény:

$$U_{ki1RMS} = U_s \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4p} \sin\left(2a + \frac{p}{6}\right)}. \quad (4.24)$$

Mind a két számításnál figyelembe vettük az ismétlődő alakú impulzusokat.

$\pi/2 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ tartomány:

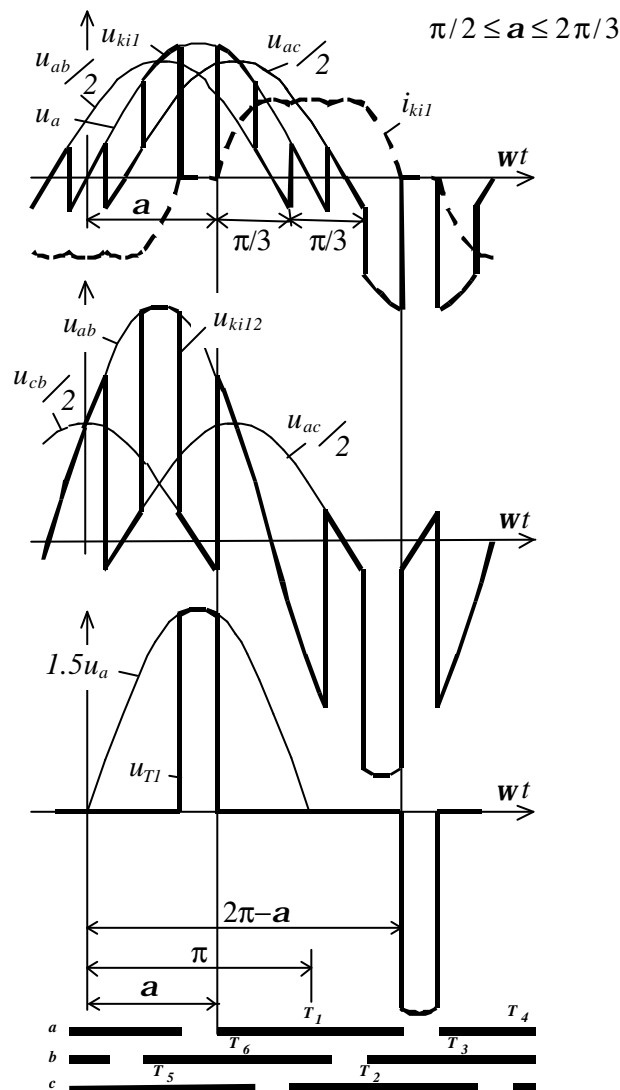
A harmadik vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.13. ábrán láthatók. $\pi/3$ -nál rövidebb kétfázisú vezetési- és árammentes szakaszok váltogatják egymást. Az összes tirisztor két egymást követő szakaszban vezet periódusonként. Mivel a tirisztorok gyújtása előtt árammentes a kapcsolás, egyszerre két tirisztort kell begyújtani, hogy kialakuljon a zárt áramkör. Ehhez a háromfázisú hídkapcsolás szaggatott kimeneti áramú üzemmódjához hasonlóan, az összes tirisztor gyújtását $\pi/3$ szöggel később, - együtt a soron következő tirisztor első gyújtásával -, meg kell ismételni (vagy $\pi/3$ -nál szélesebb gyújtójelet kell alkalmazni). Mivel a gyújtásokat követően a kimenetre kapcsolódó vonali feszültséggel arányos a kimeneti- és a vezető tirisztorok árama, annak nulla átmeneteiben kialszanak a vezető tirisztorok. Az u_{ki1} a vezetési állapottól függően a (4.18) szerinti fél vonali vagy nulla feszültség. A többi vizsgált feszültség is a (4.18) összefüggések szerint határozható meg.



4.13. ábra. R_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái a $\pi/2 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ tartományban

$\pi/2 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ tartomány:

Az első vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.15. ábrán láthatók. Itt minden tirisztor $2\pi/3$ tartománynál hosszabb ideig vezet, időben szimmetrikusan a hozzá kapcsolódó fázisfeszültség soron következő nulla átmenetére. Ebben a vezérlési tartományban az adott fázishoz tartozó induktivitás feszültsége ezen nulla átmenetekre nézve páratlan, illetve az árama páros időfüggvény. A fázisáramok az induktivitásokra jutó feszültség integrálásával állíthatók elő, figyelembe véve az $1/L$ arányossági tényezőt. A vezetési sémából láthatóan három és kétfázisú vezetési szakaszok váltogatják egymást, amelynek megfelelően a vezető fázisok induktivitásaira fázis-, illetve fél vonali feszültség szakaszok jutnak a (4.18) összefüggéseknek megfelelően.

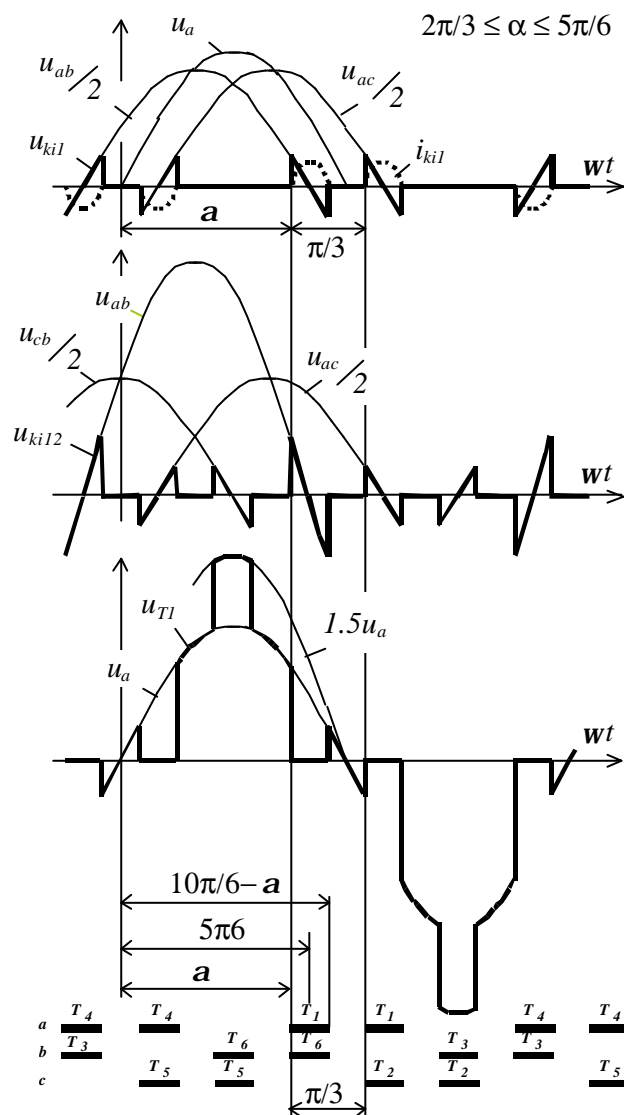


4.15. ábra. L_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái a $\pi/2 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ tartományban

Az $\alpha = \pi/2$ gyújtásszögnél az ellenpárhuzamos tirisztorok rövidzárként viselkednek, mivel az egyes tirisztorok a hozzájuk tartozó szinuszos fázisáram természetes irányváltásának pillanatában kapják a gyújtójelet. Ha a gyújtásszög kisebb mint $\pi/2$, de a gyújtóimpulzus széles, az áramkör állandósult állapotban úgy viselkedik, mintha $\alpha = \pi/2$ -nél gyújtottunk volna!

$2\pi/3 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ tartomány:

A második vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezérlési sémával a 4.16. ábrán láthatók. Itt az összes tirisztor kétszer, de $\pi/3$ tartománynál rövidebb ideig vezet periódusonként. Ebben a vezérlési tartományban is az adott fázishoz tartozó induktívitás feszültsége a fázisfeszültség nulla átmenetekre



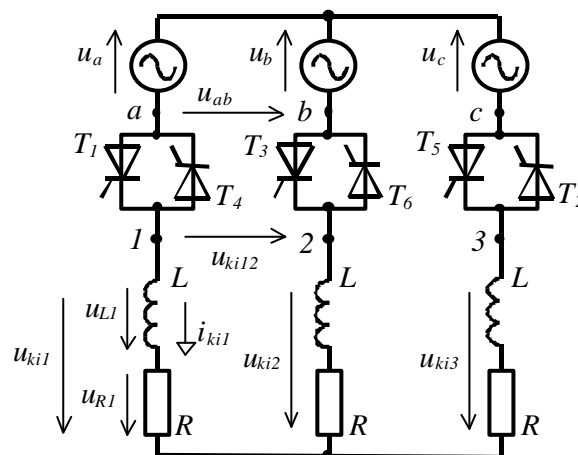
4.16. ábra. L_Y terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezérlési sémái a $2\pi/3 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ tartományban

nézve páratlan, illetve az árama páros időfüggvény. A vezetési sémából is láthatóan $\pi/3$ -nál rövidebb kétfázisú vezetési és árammentes tartományok váltogatják egymást, amelynek megfelelően a vezető fázisok induktivitásaira fél vonali és nulla feszültség szakaszok jutnak a (4.18) összefüggéseknek megfelelően. Egy-egy áramimpulzus időben szimmetrikus a fázis kimenetre kapcsolódó fél vonali feszültség nulla átmenetére. Az ohmos terhelés utolsó vezérlési tartományához hasonlóan, itt is meg kell ismételni a rövid idejű gyújtóimpulzust, amikor a soron következő tirisztor vezérlőjelet kap, vagy $\pi/3$ -nál szélesebb gyújtójelet kell alkalmazni. A fázisáram és feszültség közötti kapcsolat az előző szakasz szerinti.

Az ábrák alapján a kimeneti fázis- és vonali feszültségek effektív értéke a $\pi/2 \leq \alpha \leq 5\pi/6$ vezérlési tartományban a maximumtól nulláig változtatható.

4.3.2.3. Soros $(R+L)_Y$ terhelés

A 4.17. ábrán látható nullavezető nélküli háromfázisú, váltakozóáramú szaggató fázisonként soros $R+L$ terhelésénél szintén két jellemző gyújtási tartomány különböztethető meg, attól függően, hogy milyen vezetési állapotok alakulhatnak ki az áramkörben. A két gyújtási tartomány α_H határa $\pi/2$ és $2\pi/3$ szögek közé esik. A kimeneti fázis- és vonali feszültségek effektív értéke $j \leq \alpha \leq 5\pi/6$ vezérlési tartományban a maximumtól nulláig változtatható. A j a terhelés adott frekvenciához tartozó fázisszöge. A kimeneti fázisfeszültség ismeretében a terhelés bármely részfeszültsége vagy az árama a soros $R+L$ terhelésre vonatkozó differenciálegyenlet alapján minőségileg felrajzolható.



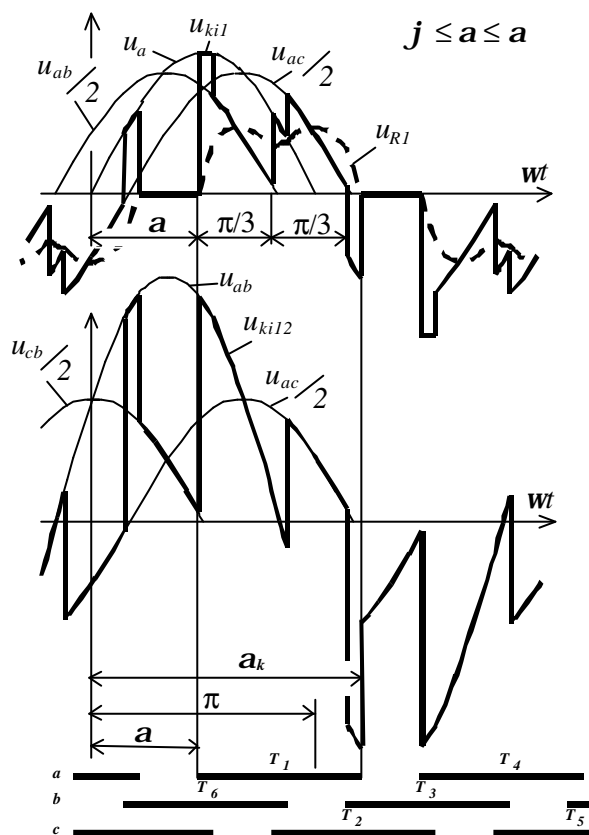
4.17. ábra. Soros $(R+L)_Y$ terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató kapcsolási rajza

Az $\alpha = j$ gyújtásszögnél az ellenpárhuzamos tirisztorpárok rövidzárként viselkednek, mivel az egyes tirisztorok a hozzájuk tartozó szinuszos fázisáram természetes irányváltásának pillanatában kapják a gyújtójelet. Ha a gyújtásszög kisebb

mint \mathbf{j} , de a gyújtóimpulzus széles, az áramkör állandósult állapotban úgy viselkedik, mintha $\mathbf{a} = \mathbf{j}$ -nél gyújtottunk volna.

$\mathbf{j} \leq \mathbf{a} \leq \mathbf{a}_H$ tartomány:

Az első vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.18. ábrán láthatók. Itt minden tirisztor $2\pi/3$ -nél nagyobb, de a tiszta induktív terheléshez képest rövidebb tartományban vezet. A vezetési sémából láthatóan három és kétfázisú vezetési szakaszok váltogatják egymást, amelynek megfelelően a vezető fázisok terheléseire a (4.18) összefüggéseknek megfelelő fázis-, illetve fél vonali feszültség szakaszok jutnak. Az \mathbf{a}_k kialvási szög gyakorlatilag csak szimulációval határozható meg.

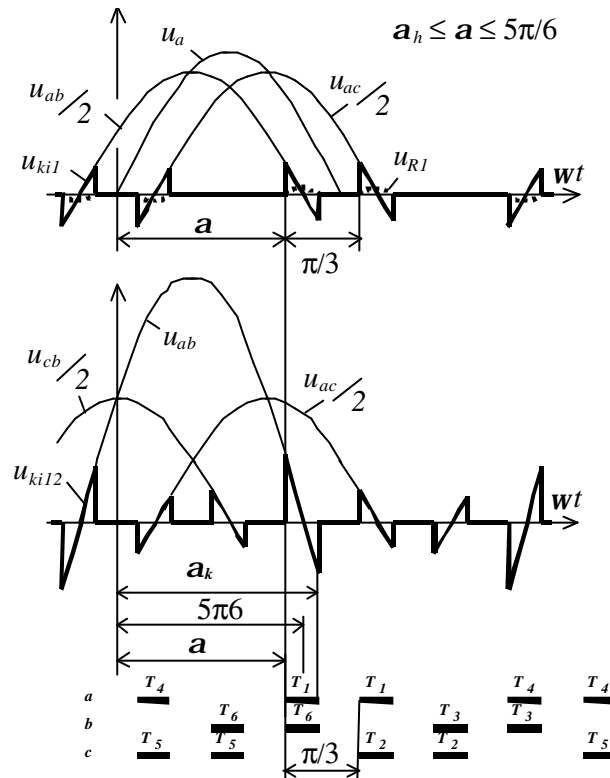


4.18. ábra. Soros $(R + L)_Y$ terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái a $\mathbf{j} \leq \mathbf{a} \leq \mathbf{a}_H$ tartományban

$\mathbf{a}_H \leq \mathbf{a} \leq 5\pi/6$ tartomány:

A második vezérlési tartományhoz tartozó időfüggvények a hozzájuk tartozó vezetési sémával a 4.19. ábrán láthatók. A vezetési sémából is láthatóan $\pi/3$ -nál rövidebb kétfázisú vezetési és árammentes tartományok váltogatják egymást, amelynek megfelelően a fázisok terheléseire fél vonali és nulla feszültség szakaszok jutnak a

(4.18) összefüggéseknek megfelelően. Az összes **ú**risztornak két egymást követő szakaszban kell vezetnie, tehát meg kell ismételni a rövid idejű gyújtóimpulzust, amikor a soron következő tirisztor vezérlőjelet kap (vagy $\pi/3$ -nál szélesebb gyújtójelet kell alkalmazni). Mivel az áram impulzusokat csak egy-egy fél vonali feszültség szakasz hozza létre, az \mathbf{a}_k kialvási szög meghatározására a 3. fejezetben ismertetett iterációs formula vagy a kialvási jelleggörbék alkalmazhatók. Itt figyelemmel kell lenni arra, hogy a 4.19 ábrán láthatón, a fél vonali feszültség szakaszok $\mathbf{a}' = \mathbf{a} + \pi/6$ fázisszögnél kapcsolódnak a terhelésre.



4.19. ábra. Soros $(R + L)_Y$ terhelésű, nullavezető nélküli, háromfázisú váltakozóáramú szaggató időfüggvényei és a tirisztorok vezetési sémái az $\mathbf{a}_H \leq \mathbf{a} \leq 5\pi/6$ tartományban

A két gyújtási tartomány $\mathbf{a} = \mathbf{a}_H$ határán $\pi/3$ tartományonként váltakozva kettő-kettő fázis vezet. Itt egy tirisztor egymást követően kétszer $\pi/3$, tehát összesen $2\pi/3$ tartományban vezet. Ebben a határhelyzetben a 4.19. ábra értelmezése szerint

$$\mathbf{a}_k - \mathbf{a} = \mathbf{a}_k - \mathbf{a}_H = \pi/3. \quad (4.28)$$

A fenti összefüggés figyelembe vételével a kialvási jelleggörbe segítségével \mathbf{a}_H meghatározható.

Tartalomjegyzék

4. Váltakozóáramú szaggatók	4 – 1
4.1. Bevezetés	4 – 1
4.2. Egyfázisú váltakozóáramú szaggatók	4 – 2
4.2.1. Ohmos terhelés	4 – 3
4.2.2. Soros $R + L$ terhelés	4 – 4
4.2.3. Belső feszültséget tartalmazó terhelés	4 – 7
4.3. Háromfázisú váltakozóáramú szaggatók	4 – 9
4.3.1. Háromfázisú váltakozóáramú szaggató nullavezetővel	4 – 9
4.3.2. Háromfázisú váltakozóáramú szaggató nullavezető nélkül	4 – 10
4.3.2.1. Ohmos terhelés	4 – 11
4.3.2.2. Induktív terhelés	4 – 16
4.3.2.3. Soros $(R + L)_Y$ terhelés	4 – 19