

A HÁLÓZATI FESZÜLTÉGSZABÁLYOZÁS NÉHÁNY KÉRDÉSE

GÁDOR LÁSZLÓ*

A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA

A villamos energia szolgáltatás egyik fontos minőségi jellemzője a hálózat feszültsége. A bonyolult elosztó rendszerben a termelés és felhasználás helyének a távolsága, a terhelések állandóan változó alakulása, a vezetékeken létrejövő feszültség- esések következtében szabályozás nélkül nem oldható meg, hogy a feszültségek minde- nütt az adott tűrési sávon belül maradjanak. A feszültségszabályozás rendszere követi az elosztórendszer felépítését: szabályozás gondoskodik a feszültség-ingadozások kikü- szöböléséről a termelés helyén, az erőművekben, a nagy- és közepfeszültségű hálózat fontosabb csomópontjaiban és végül a kiefeszültségű hálózat egyes részein. Ez utóbbi feladatra megfelel minden szempontból a rendkívül egyszerű felépítésű kétállású szabályozó.

1. Bevezetés

Századunk technikai fejlődésének egyik jellemző vonása a villamosítás gyors térhódítása. A termelés általános bővülésével nemcsak lépést tart a növekvő energia felhasználás, hanem azt meg is előzi. Ezen belül pedig egyre nagyobb részesedéssel szerepel a villamos energia. Ez utóbbinak átlagos évi 7,2%-os növekedési rátája közel kétszerese az összenergia fogyasztás növeke- désének. Míg a század elején a világon kitermelt összes primer energiahordo- zónak csupán néhány százalékát fordították villamos energia fejlesztésére, ma már ez a részesedés 25% körül jár és a prognoszták az ezredfordulóra 50–60%-ra becsülik ezt az értéket.

A villamos energia felhasználás emelkedésének számottevő tényezője a háztartási fogyasztás meredek emelkedése. De a termelő iparban is egyre nagyobb szerephez jutnak a villamos energia felhasználásán alapuló techno- lógiák, ami az automatika és a számítástechnika erőteljesebbé váló alkalma- zásával is összhangban van, hiszen a villamos energia a legkönnyebben irányít- ható energiatípus. Bővül a villamos vasúti hálózat, a villamosság mint hajtóerő lassan behatol a sínhez nem kötött járművek területére is.

A villamos energia a leguniverzálisabban használható energiatípus. Szerepe az energiagazdálkodásban olyan, mint a pénzé a gazdasági életben: bármilyen energiatípusra könnyen beváltható, legyen az mechanikai, hő-, kémiai vagy fényenergia.

* Dr. Gádor László, 1012 Budapest, Attila út 111.

A villamos energia túlnyomó többségében a jövőben is nagy teljesítményű, koncentrált erőművekben termelődik. Nem változtat ezen a helyzeten az atomenergiának, mint primer energiaforrásnak a térhódítása sem, technológiai okokból az atomerőművek is nagy központi telepek alakjában szolgáltatják az energiát. A hagyományos erőművek általában a fosszilis energialelőhelyekre települnek, az atomerőművek biztonsági és környezet-tisztasági okokból ugyancsak a lakott helyektől távol kapnak helyet. Így a villamos energia elosztás rendszere a belátható jövőben lényegében nem változik, legfeljebb a távolságok, a teljesítmények, a hálózatok bonyolultsága nő.

A villamos energia mennyiségi növekedésével párhuzamosan a minőségi követelmények is szigorúbbá válnak. A kiterjedtebb és igényesebb fogyasztó tábor nagyobb felelősséget ró az áramszolgáltatóra.

A szolgáltatás minősége szempontjából a legfontosabb kritériumok az áramellátás folyamatossága, a frekvencia és a feszültség állandó értéken tartása.

A korszerű hálózaton e követelmények kielégítése másképp, mint automatikus eszközökkel, már el sem képzelhető. Az önműködő gyors visszkapcsolás eszközei az óhatatlanul bekövetkező üzemzavarok hatását az esetek 90%-ában a másodperc tört részéig tartó felszűntetésre vagy -kimaradásra korlátozzák, ami általában még a kényesebb felhasználási helyeken sem zavarja meg a működést.

A frekvencia az előállítás helyén szabályozható, az elosztó rendszerbe betáplált villamos energia frekvenciáját az átvitel nem módosítja, az az egész hálózaton egyformán érvényesül.

Feszültség szempontjából már nem ilyen egyszerű a helyzet, e tekintetben a bonyolult elosztó hálózat a mindenkori terhelési viszonyoktól függően meglehetősen tarka képet nyújt. A feszültségek a vezetékeken fellépő feszültségesések következtében a fogyasztási helyeken sem nem névleges értékűek, sem nem egyformák. Akkor sem, ha az előállítás helyén szabályozással biztosítjuk azok névleges vagy meghatározott értékét. A táppontok, a fogyasztási pontok, az azokat összekötő hálózat, a pontonkénti terhelések szeszélyes alakulása, a betáplálás ehhez valamennyire igazodó, ugyancsak táppontonként változó értéke bonyolult rendszerre áll össze, amelyben a feszültségeloszlás nívóvonalai csak itt-ott fekszenek a névleges feszültség szint síkjában, másutt vagy alatta, vagy fölötte járnak s mindez még az időben is változik.

A fogyasztók ellátását a névleges feszültségű villamos energiával úgy lehetne biztosítani, hogy minden egyes fogyasztó mellé egy-egy feszültség-szabályozót helyezünk. A szabályozás ilyen mérvű decentralizációja azonban nem látszik gyakorlatilag kivihetőnek.

A gyakorlatban úgy juthatunk célszerűen közelebb a kívánt célhoz, hogy a névleges feszültség merev értékét megegyezés vagy döntés alapján — amint ez a műszaki gyakorlatban általában szokásos — tűrési sávva szélesítjük,

például $\pm 5\%$ értékben. Ezt követően a feszültségtérkép fel-le hullámzó domborzatán kijelölünk néhány jól kiválasztott pontot és ott a környezetben fennálló terhelési és feszültség viszonyokhoz alkalmazkodó szabályozóval befolyásoljuk a feszültséget.

2. A feszültségszabályozás gazdaságossága

Műszaki intézkedéseinket soha nem csak műszaki megfontolások motíválják, azoknak gazdaságosság szempontjából is megalapozottaknak kell lenniük. Ha szabályozókat telepítünk a villamos hálózaton, tisztában kell lenniük azzal, hogy milyen kár származik abból, ha gépeink, berendezéseink a névlegestől eltérő feszültségen üzemelnek.

Ennek a gazdasági kárnak a megítélésében támaszkodunk P. AILLERET gondolatmenetére.

Fel kell tételeznünk, hogy egy jól szerkesztett és méretezett berendezés adott kivitelében és névleges paramétereivel működik a leggazdaságosabban. A működés gazdaságosságán itt nemcsak a nyújtott szolgáltatást és annak hatásfokát értjük, hanem a kedvező élettartamot is. Hiába nyújt egy berendezés nagyobb feszültségen többet, esetleg még a hatásfoka is jobb, ha üzeme az élettartam rovására megy és így végül is többet veszítünk a réven, mint amennyit nyertünk a vámon.

Legyen ez a mindent magában foglaló optimális gazdaságosság G , amely tehát függvénye a konstrukciónak és a paramétereknek. Ez utóbbiak közül minket e pillanatban csak a feszültség érdekel:

$$G = g(K, U),$$

ahol U a feszültség, K maga is egy sokváltozós függvény, amely tartalmaz minden szerkezeti és parametrikus változót, amely a feszültségen kívül a gazdaságosságot befolyásolja.

Névleges feszültségen tehát a gazdaságosságnak szélső értéke van:

$$\frac{\partial}{\partial U} g(K, U) = 0. \quad (1)$$

Ha most a berendezést a névlegestől eltérő $U + \Delta U$ feszültségen járattuk, gazdaságossága is megváltozik, $G + \Delta G$ lesz. A változás

$$\Delta G = g(K, U + \Delta U) - g(K, U). \quad (2)$$

Ezt a változást, tehát az optimális gazdaságossághoz képest adódó eltérést tekinthetjük a feszültségváltozás okozta gazdasági kárnak. Fejtsük sorba a (2) kifejezést, elhanyagolva a másodrendűnél magasabb rendű tagokat:

$$\Delta G = \Delta U \frac{\partial}{\partial U} g(K, U) + \frac{1}{2} (\Delta U)^2 \frac{\partial^2}{\partial U^2} g(K, U).$$

A kifejezés első tagja (1) értelmében zérus, tehát

$$\Delta G = \frac{1}{2} (\Delta U)^2 \frac{\partial^2}{\partial U^2} g(K, U). \quad (3)$$

Eszerint a gazdaságosság csökkenése a névlegestől eltérő feszültségen üzemelő berendezésnél első megközelítésben a feszültségeltérés négyzetével arányos. Ugyanakkora kárt okoz tehát a feszültségeltérés megváltozása 5%-ról 7%-ra, mint a névleges feszültséghez képest kialakuló 5%-os eltérés. Ez az összehasonlítás is igazolni látszik egy tűrési sáv létjogosultságát a névleges feszültség környezetében.

Megjegyzendő, hogy a feszültségeltérés okozta gazdasági kár mértéke nem független a berendezés természetétől, más egy villamos motor, más egy izzólámpa esetében és nem mindig hanyagolhatjuk el nyugodt lélekkel a sorba fejtett kifejezés magasabb rendű tagjait. Statisztikusan azonban közel járunk a valósághoz, ha a gazdaságosság megítélésében a feszültségeltérés négyzetével számolunk.

3. A feszültség szabályozás rendszere

A végső cél az, hogy a feszültség a felhasználás helyén ne lépjen ki a tűrési sávból. A térben rendkívül kiterjedt, országos vagy esetleg kontinentális méretű elosztó rendszerben a szabályozásnak igazodnia kell a rendszer hierarchikus felépítéséhez. A magasabb szintű szabályozás elmaradása megoldhatatlanul nagy feladatot róna a fogyasztó-közei szabályozásra. Közpon-tosan azonban nem oldható meg a feladat, mert ugyanaz a központi terhelés az ellátott terület fogyasztóinak a legváltozatosabb helyi felhasználásaiból összegeződhet, amivel a körzeten belüli feszültségviszonyok változatos elosz-lása is együtt jár.

Szabályozni kell tehát a feszültséget a termelés helyén, szabályozni kell a nagy- és középfeszültségű hálózat fontosabb csomópontjain és általában célsze-rű feszültségszabályozást alkalmazni a kiefeszültségű fogyasztói hálózaton is.

Ebben a sorban az erőműtől a fogyasztó felé haladva nagyságrendekkel csökken a szabályozó teljesítménye, általában egyszerűsödnek a velük szemben támasztott műszaki követelmények, növekszik a felhasznált szabályozók száma, csökken az egységárak.

Már korábban említettük, hogy az energiaszolgáltatás minőségéhez kapcsolódó jogos elvárások kielégítése ma már csak önműködő eszközökkel képzelhető el. Ami a feszültségszabályozást illeti, már a középfeszültségű hálózat csomópontjaiban működő szabályozók nagy része is személyzet nélküli alállomásokon kap helyet, ahol az állandó figyelés terhes kényszerétől elte-kintve is csak automatikus berendezés jöhet tekintetbe. Nem is beszélve a szekunder hálózatokon elszórt, oszlopokra, házfalakra szerelt, a rendszeres kezelés köréből teljesen kieső készülékekről.

4. Megoldások

Legnagyobb a felelőssége a hierarchikus rendszer csúcsán működő erőművi szabályozónak, amely a generátor gerjesztésébe avatkozik be. Ezt a feladatot ma már gyakorlatilag kizárólag gyors működésű, folytonos elektronikus szabályozók látják el, amelyet a gyártó mű a generátorral együtt szállít.

Az elosztó hálózaton a feszültséget csak transzformációval lehet befolyásolni, így minden, a hálózaton alkalmazott feszültségszabályozó valamilyen fajta transzformátor, amelynek az áttételét kell bizonyos határok közt változtatni.

A transzformátor áttételét lehet módosítani úgy, hogy megváltoztatjuk az aktív részek — tekercselések, vasmag — kölcsönös helyzetét, vagy megváltoztatjuk a menetszám áttételt, célszerűen valamelyik tekercselés megcsapolásainak az átkapcsolásával. Az előbbi módon nagyobb tömegeket kell mozgatni, de megvan a folytonos szabályozás lehetősége. A gyakorlat az utóbbi mellett döntött, minthogy az még a nagy feszültségek és nagy teljesítmények tartományában is jól megvalósítható szerkezetekhez vezet, bár azon az áron, hogy a feszültséget csak fokozatokban tudja változtatni. Elég nagy fokozatszám esetén még viszonylag nagy, $\pm 15\%$ vagy $\pm 22\%$ szabályozási tartományon belül sem kell $1 \div 2\%$ -nál nagyobb lépcsőket alkalmazni, ami a szabályozó átkapcsolásakor még nem hat zavaróan a hálózaton, ugyanakkor jóval belül van a megengedett tűrési sávon.

A szabályozás pontossága egyébként nem egyezik a lépcsővel, hanem annál valamivel rosszabb. Egy lépcsős szabályozó stabilitási kritériuma rendkívül egyszerűen megfogalmazható: a holtáv legyen nagyobb a lépcsőnél. Ha ezt a szabályt betartjuk, akkor nem fordulhat elő instabil üzem, ami lépcsős szabályozónál szüntelen ide-oda kapcsolgatásban nyilvánul meg.

A nagy- vagy középfeszültségű hálózat csomópontjában elhelyezett szabályozó célja az, hogy a fogyasztó feszültségét az előírt határok között tartsa. De nem azt érzékeli, hanem a saját feszültségét.

Ha a szabályozó egyetlen fogyasztót látna el egy hosszú vezetéken, akkor a problémát egy egyszerű terhelés kompenzációval át lehetne hidalni. A szabályozó helyén érzékelni lehet az áramterhelést és a szabályzott feszültség alapértékét azzal arányosan úgy kell megemelni, hogy éppen kiegyenlítse az ugyancsak a terheléssel arányos vonali feszültségesést.

A valóságos helyzet ennél bonyolultabb, a csomópontból ellátott körzeten belül a terhelések más-más törvények szerint vagy véletlenszerűen oszlanak meg és a csomópont terheléséből nem tudunk egyértelműen következtetni egy-egy fogyasztó feszültségére. Ilyenkor a körzetet elemezni kell ebből a szempontból. Ha a terhelések alakulása az egész körzetre kiterjedően elég jó korrelációt mutat, az előbbi módszerrel még belül maradhatunk a tűrési sávon. Ellenkező esetben további intézkedés kell: a fogyasztók olyan átcsoportosítása, a körzethatárok újabb megállapítása úgy, hogy azokon belül a korre-

láció helyreálljon; további szabályozók beállítása a tűrésí sávból kilépő fogyasztók érdekében.

A hálózati feszültségváltozások regisztrátumát kézbe véve, azon kétféle mozgást észlelhetünk. Látunk kis hullámhosszú kilengéseket, a ki- és bekapcsolások, indítások, terheléslökések okozta, esetleg csak a másodperc tört részéig, máskor néhány másodpercig tartó feszültségváltozásokat, amelyek mértéke azonban kiléphet a hóltsáv korlátai közül. A másik mozgás a feszültség szint lassú, órákban mérhető eltolódása a statisztikus terhelés megváltozása következtében.

A feszültség szabályozásnak nem célja az első típusú feszültségmozgások megszüntetése. Az állandó kapcsolgatás inkább csak nyugtalanná tenné a hálózatot és nagyon hamar kimerítené a szerkezet élettartamát. Ezért perc nagyságrendű időkéleltetés óvja meg a szabályozót a céltalan kapcsolgatásoktól, aminek eredményeként a szokásos üzemi körülmények közt napi mintegy $10 \div 15$ átkapcsolásra számíthatunk.

A hazai nagy- és közép feszültségű hálózat számára a Ganz Villamossági Művek készíti a feszültség szabályozós transzformátorokat, az esetek többségében olyan kivitelben, hogy az a feszültség szabályozás és a transzformáció feladatát egy egységben oldja meg. Az átkapcsolást vezérlő automatikát a Villamosipari Kutató Intézet fejlesztette ki szoros együttműködésben a Magyar Villamos Művek Tröszttel.

5. Szabályozás a szekunder hálózaton |

A hierarchia legalsó fokán a 400/230 voltos szekunder hálózat szabályozása áll. Mégis e téma tárgyalásának most valamivel nagyobb teret szentelünk, mert az e célra szolgáló eszközök kifejlesztése során néhány érdekes elemzésre és megállapításra nyílt alkalom.

Hazánkban néhány éve foglalkozunk a kisméretű hálózatok szabályozásával. Különösen indokolt ez a szabályozás azokban a fogyasztói körzetekben, ahol a területegységre számított fajlagos fogyasztás kicsi. Tehát nem a sűrűn lakott városközpontokban, hanem a laza településű városszéli és falun, ahol egy táppontról hosszú vonalak ágaznak ki és ezeken tekintélyes feszültségesések léphetnek föl. Meg kell jegyezni, hogy a szekunder hálózati feszültségviszonyok szabályozás útján elért javításában nemzetközi viszonylatban is úttörő munkát végeztünk.

A szabályozó egy ponton kapcsolódik a szabályozandó rendszerhez, ott érzékel és ott avatkozik be. Egyetlen közös szabályozóval elvileg sem érhető el tökéletes értéktartás egy térben kiterjedt rendszerben, amelyben a szabályozott paraméter a helynek is függvénye.

Ha a feladat az, hogy a feszültséget egy helyen, egyetlen fogyasztó számára tartsuk minél pontosabban állandó értéken, akkor a folytonos vagy

finoman lépcsőzött szabályozó nyújtja a legtökéletesebb megoldást. Ugyanezt állapíthatjuk meg egy olyan fogyasztói körzetről, amelyen belül számottevő feszültségkülönbségek nem lépnek föl, a rendszer nagyjából egy egészként változtatja a feszültségét.

A szekunder hálózati szabályozás feladata azonban ettől eltér, célja a nagy feszültségesesű vonalak viszonyainak a javítása, a szabályozatlan vonalon fellépő feszültségesések mérséklése, illetve azok behatárolása a tűrési sávba.

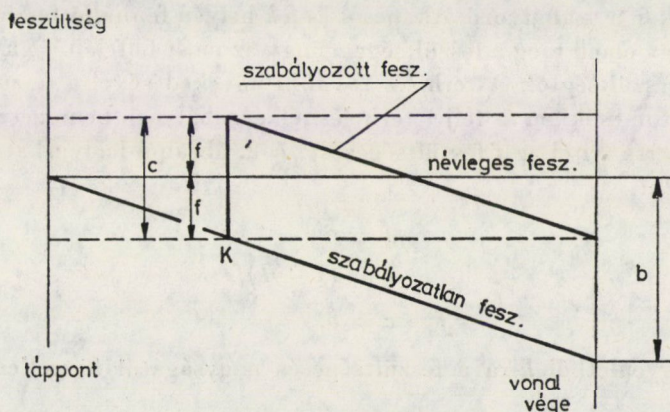
E speciális feladat megoldására, mint erre legmegfelelőbbet és leggazdaságosabbat, a kétállású szabályozót javasoltuk. Az alábbi vizsgálat ennek a választásnak a jogosultságát hivatott eldönteni, összehasonlítva azt a folytonos, illetve többlépcsős szabályozóval.

A vizsgálódás megkönnyítésére néhány egyszerűsítő feltevést vezetünk be, miáltal a viszonyok sokkal áttekinthetőbbé válnak anélkül, hogy ez az összehasonlító megállapítások elvi értékén változtatna.

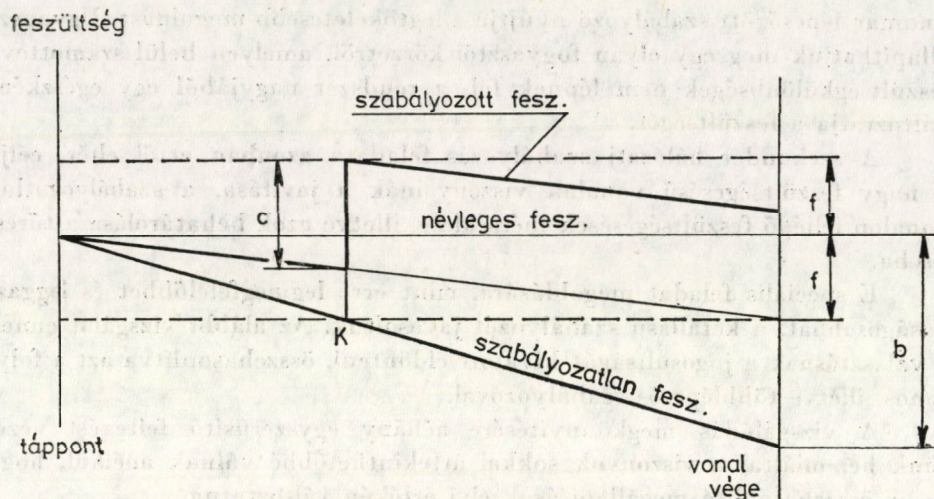
Az első egyszerűsítés, hogy a feszültségesést a vizsgált vonal mentén a hosszúsággal arányosnak tekintjük. Eltekintünk továbbá a szabályozás során fellépő másodlagos hatásokról, például attól, hogy a szabályozás következtében a terhelés is megváltozik. Figyelmen kívül hagyjuk, hogy a szabályozó meghatározott áttételű transzformátor, tehát a feszültségváltoztatás abszolút értéke nem független a bemeneti feszültség értékétől. Nem vesszük figyelembe a szabályozáshoz egyébként nélkülözhetetlen holsávot sem. Első lépésben a táppont feszültségét is rögzítettnek tekintjük.

A feszültségszabályozás kritériumának a feszültségeltérés nagyságát vesszük. Tehát a szabályozó beavatkozását úgy határozzuk meg, hogy a vonal mentén bárhol fellépő feszültségeltérés a lehető legkisebb legyen.

Helyezzük el a szabályozót az egységnyi hosszúságúnak vett vonal k hányadában (1. ábra). A szabályozó működési elvétől függetlenül egy feszült-



1. ábra. Vonali feszültségek alakulása folytonos szabályozás esetén



2. ábra. Vonali feszültségek alakulása kétállású szabályozás esetén

ségugrást hoz létre, a különbség csak annyi, hogy a folytonos szabályozó ezt az ugrást folytonosan képes változtatni a mindenkori feszültségeséshez igazodva, míg a kétállású szabályozó egy előre meghatározott nagyságú ugrással avatkozik be akkor, ha a feszültségesés egy bizonyos határt elért (2. ábra).

Legyen a vonal legnagyobb feszültségesése teljes terheléssel b . Folytonos szabályozóval a leghatásosabb működést akkor érzük el, ha azt a vonal harmadába helyezzük el, $k = l/3$. Ekkor a legnagyobb feszültségtérés teljes terheléssel $f = b/3$. A szabályozó típusjelzőjét az előforduló legnagyobb c feszültségemelés határozza meg, ez esetünkben $c = 2f = 2b/3$.

A kétállású szabályozó mindaddig nem avatkozik be, amíg a szabályozatlan feszültségesés a vonal végén el nem éri a megengedett legnagyobb f értékét. Ekkor a szabályozó átkapcsol és a k helyen fennálló feszültségzintről c értékkel úgy emeli meg a feszültséget, hogy az most felfelé térjen el f értékkel a névleges feszültségtől. A terhelés további növekedésével a feszültség értéke minden ponton csökken és teljes terhelésnél a szabályozó bemenetén és a vonal végén egyszerre éri el az f feszültségesést. A 2. ábrából leolvashatók az alábbi összefüggések:

$$f = kb,$$

$$c = (1 + k)f,$$

$$f + c = b.$$

E három egyenletből k -ra a feszültségesés nagyságától független egyenletet kapunk:

$$k^2 + 2k - 1 = 0,$$

ahonnan

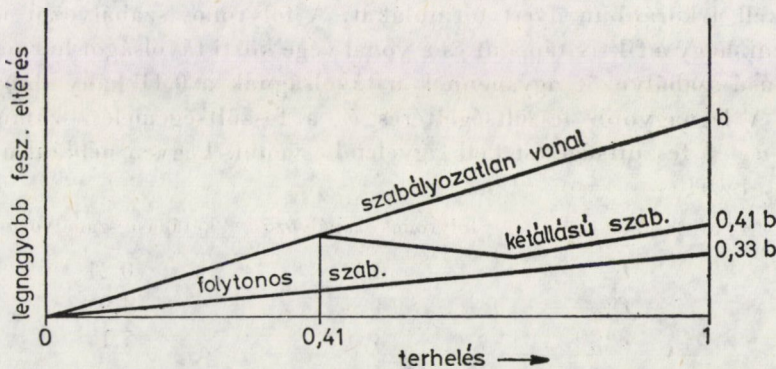
$$k = 0,41. \quad (4)$$

A kétállású szabályozó elhelyezésére tehát a feszültségesés nagyságától függetlenül adódik az egyértelmű optimum. A felírt egyenletek alapján a legnagyobb feszültségeltérés $f = 0,41b$, a szabályozó teljesítményére jellemző feszültségemelés $c = 0,59b$. A kétállású szabályozóval adott vonalon a legnagyobb feszültségesés 41 százalékánál kisebb feszültségeltérést tehát nem tudunk elérni, s ehhez $0,59b$ feszültséglépcső szükséges. Ha a feszültséglépcsőt ennél nagyobbra választjuk, csak rontunk a helyzeten.

A 3. ábra a terhelés függvényében mutatja be a vonal mentén fellépő legnagyobb feszültségeltérés alakulását. A folytonos szabályozó hatására kialakuló eltérés a terheléssel arányosan nő legnagyobb $f = b/3$ értékéig. A kétállású szabályozó 0,41 terhelésnél szólal meg, addig a feszültségeltérés menete megegyezik a szabályozatlan vonaléval. A szabályozó működése az átkapcsolás pillanatában nem csökkenti az éppen fennálló feszültségeltérést, csak az most nem a vonal végén, hanem a szabályozó kimenetén jelenik meg. Ezután valamelyest csökken a feszültségeltérés, amíg a szabályozó bemeneti oldalán növekedő eltérés át nem veszi a dominanciát, végül teljes terhelésnél ismét eléri maximális $0,41b$ értékét.

Amint az összehasonlításból kitűnik, jelentős eltérés a két szabályozó hatása közt a kis terheléseknél van, mielőtt még a kétállású szabályozó egyáltalán megszólal. A nagyobb feszültségeltérések tartományában, amely a szabályozás létjogosultságát voltaképpen megadja, az eltérés nem számottevő.

Az összehasonlítást tegyük még teljessé annak megjegyzésével, hogy a valamivel jobb feszültségtartást a folytonos szabályozó azon az áron éri el, hogy beépített teljesítménye $0,67b$, szemben a kétállású szabályozó $0,59b$ teljesítményével. Nem is beszélve azokról a lényegesen bonyolultabb és költségesebb megoldásokról, amelyek a folytonos szabályozót megkülönböztetik a rendkívül egyszerű és megbízhatóan működő kétállású szabályozótól.

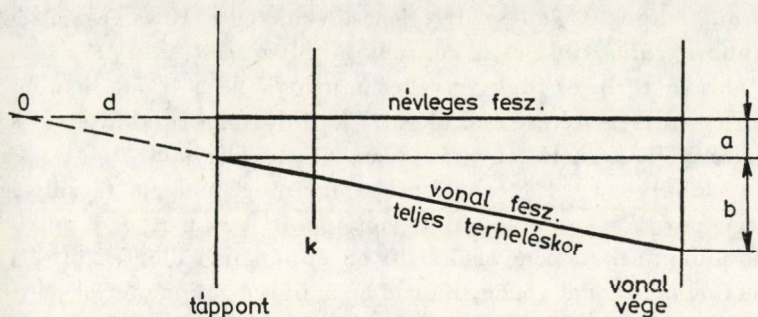


3. ábra. A vonalban fellépő legnagyobb feszültségeltérés a terhelés függvényében

6. Szabályozás változó táppont feszültséggel

A valóságos üzemi körülmények jobb megközelítése érdekében folytassuk ezt a vizsgálódást úgy, hogy az egyszerűsítő feltevések egyikét, nevezetesen a tápponti feszültség rögzített voltát mellőzzük.

A táppont feszültsége két okból és módon változhat. A tápponti transzformátor feszültségesése miatt a táppont feszültsége a terheléssel arányosan



4. ábra. A vonal feszültségeloszlása a terheléssel arányosan ingadozó tápponti feszültség esetén

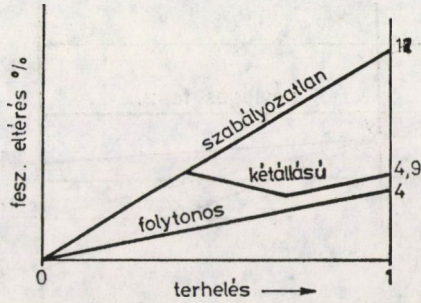
csökken akkor is, ha a transzformátor primer feszültsége állandó. Várhatóan azonban ez utóbbi sem lesz állandó, a felettes hálózat feszültsége is ingadozik bizonyos határokon belül s ez a feszültségingadozás gyakorlatilag független a szekunder fogyasztói vonalon fellépő terheléstől.

A vonal feszültségviszonyait arra az esetre, ha a táppont feszültsége csak a terheléstől függően, azzal arányosan ingadozik, a 4. ábra mutatja be. A táppont feszültségesése teljes terheléssel a , a vonalé, mint előbb is, b . A helyzet olyan, mintha a táppont mögött d távolságban a fiktív 0 rögzített feszültségű tápponttól kapná táplálását a vonal. Ha a vonal hossza az egység, akkor $d = a/b$.

Ezzel a feladatot visszavezettük a már megoldott esetre, csak alkalmazni kell a korábban nyert formulákat. A folytonos szabályozót úgy kell elhelyezni, hogy a fiktív táppont és a vonal vége közti távolságot harmadoljuk, a kétállású szabályozót ugyanennek a távolságnak a 0,41 hányadában telepítjük. A legnagyobb feszültségeltérés és a feszültségemelés számításában a teljes $a + b$ feszültségesést kell figyelembe venni. Legyen például $a = 3\%$, $b = 9\%$. Ezzel

	folytonos szabályozó	kétállású szabályozó
k	0,11	0,21
$f\%$	4	4,9
$c\%$	8	7,1

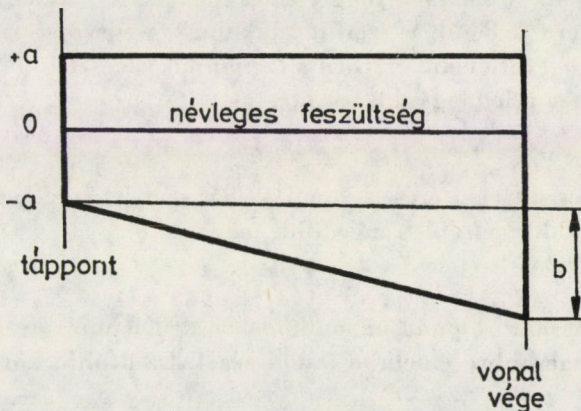
A feszültségeltérés alakulását a terhelés függvényében az 5. ábra mutatja be.



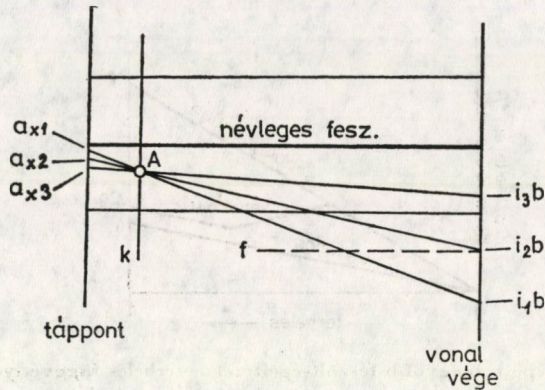
5. ábra. A vonalban fellépő legnagyobb feszültségeltérés a terhelés függvényében a terheléssel arányosan ingadozó tápponti feszültség esetén

A rögzített feszültségű tápponthez képest minőségi különbség, hogy k nem állandó érték, a szabályozó optimális helye a tápponti és a vonali feszültségesések viszonyától függ. Minél nagyobb a táppont feszültség-ingadozása a vonalhoz képest, annál hátrább helyezkedik el a fiktív táppont és annál közelebb húzódik a feszültség szabályozó helye a valóságos tápponthez. Végül, ha folytonos szabályozásnál $a = 0,5b$, illetve kétállású szabályozásnál $a = 0,7b$, a szabályozó bekerül a táppontba. Tehát ha ekkora vagy ennél nagyobb a táppont feszültség-ingadozása, akkor magának a táppontnak a feszültségét kell szabályozni.

Amint mondtunk, a táppont feszültsége a terheléstől függetlenül is ingadozhat. Ilyenkor feszültségcsökkenés és feszültségemelkedés egyaránt előfordulhat. Ha a feszültség-ingadozást szimmetrikusnak feltételezzük és az eltérést ismét a -val jelöljük, a táppont feszültség-ingadozása $\pm a$. A 6. ábra érzékelteti, hogy a feszültség a vonal egész hosszát és a független változók minden értékét figyelembe véve a vastag vonallal bekeretezett tartományban bárhol elhelyezkedhet.



6. ábra. Lehetséges feszültségek tartománya függetlenül ingadozó tápponti feszültség esetén



7. ábra. A feszültségesés vonala különböző tápponti feszültség-terhelés értékpárok esetén ugyanazon az A ponton halad át

A táppont független feszültség-ingadozásával a vonali feszültségek alakulásának a szabadságfoka eggyel megnő, egy adott helyen a feszültség többé nem csupán a terhelésnek, hanem a táppont feszültségének is függvénye. A 7. ábra bemutatja, hogy a vonal k helyén elhelyezett szabályozó egyedül az A munkaponthoz tartozó feszültség érzékeléséből nem tudja megállapítani, hogy a vonal végén a feszültségesés túllépte-e a megengedett f értéket.

Legyen a táppont feszültsége valamilyen a terheléstől független a_x érték. Legyen ugyanekkor a terhelés viszonyított értéke i , amikor is a vonalon ib feszültségesés lép fel. Amint látjuk, a feszültségesés egyenese különböző tápponti feszültség-terhelés értékpárok egyidejű fennállása esetén ugyanazon az A ponton halad keresztül. A szabályozási utasításnak tehát mind a feszültségre, mind a terhelésre vonatkozó információt tartalmaznia kell.

Egyébként a folytonos szabályozó működése és paramétereit szempontjából közömbös, hogy a táppont feszültség-ingadozása terhelésfüggő vagy attól független.

Ha a tápponti feszültség független a ingadozása viszonylag kicsi, kétállású szabályozóra a 8. ábra szerint alakulnak a viszonyok. A szabályozó bemenetén legkedvezőtlenebb esetben a C pontnak megfelelő feszültség jelenik meg, amely egyben a legnagyobb feszültségeltérés:

$$f = a + kb. \quad (5)$$

Ugyanekkor a feszültségeltérés a vonal végén sem lehet ennél nagyobb. Ha ugyanekkora feszültségeltérést engedünk meg, akkor

$$a + b = f + c. \quad (6)$$

A szabályozónak már A pontban működésbe kell lépnie, de D pontból sem szabad B -nél magasabbra emelni a feszültséget. Ez utóbbi követelmény megfogalmazása

$$(1 - k)(a + f) + c = 2f. \quad (7)$$

Fenti három egyenletből a szabályozó elhelyezésére jellemző k hányadra, a legnagyobb f feszültségeltérésre és a c feszültségemelésre az alábbi eredményeket kapjuk

$$k = \sqrt{\left(1 + \frac{a}{b}\right)^2 + 1} - \left(1 + \frac{a}{b}\right), \quad (8)$$

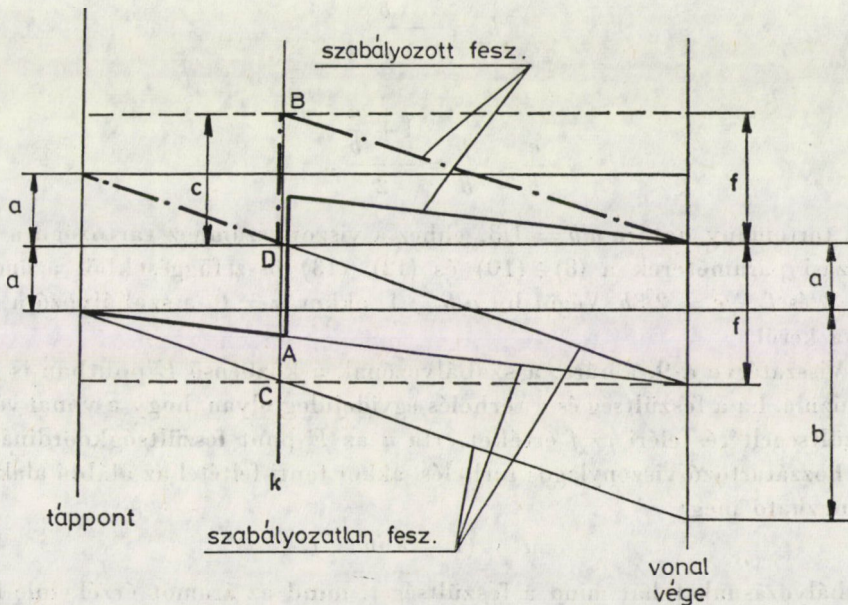
$$f = \left(\frac{a}{b} + k\right)b, \quad (9)$$

$$c = (1 - k)b. \quad (10)$$

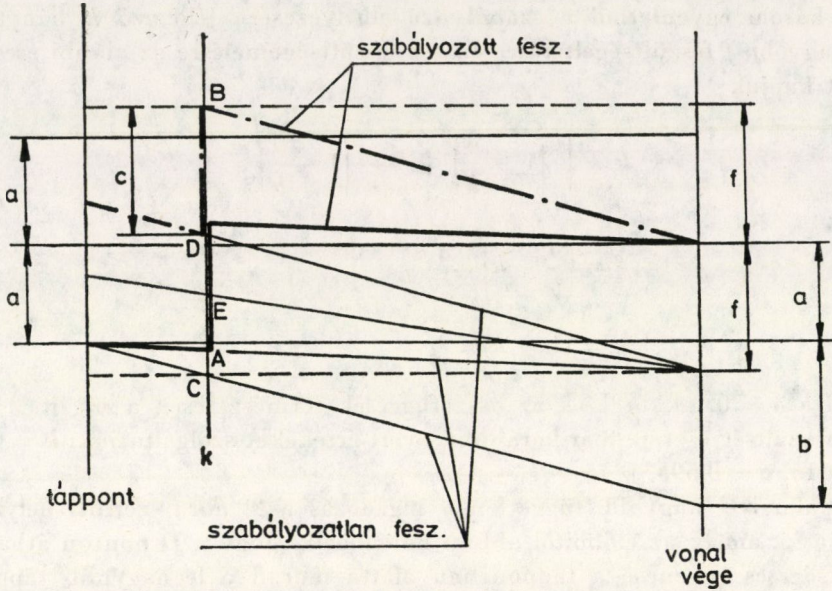
Ha $a = 0$, akkor ezek az összefüggések természetesen a rögzített tápponti feszültség esetére már korábban nyert értékeket szolgáltatják: $k = 0,41$, $f = 0,41b$, $c = 0,59b$.

Valamivel nagyobb független a ingadozás a 9. ábra szerinti helyzetet alakítja ki, amely az előbbitől abban különbözik, hogy a D ponton áthaladó feszültségese egyenese a táppontban alatta marad a legnagyobb tápponti feszültségnek. Az (5) és (6) összefüggés változatlanul érvényben marad, de (7) helyébe az alábbi formula lép:

$$(1 - k)b + c = 2f, \quad (11)$$



8. ábra. A vonalban elhelyezett kétállású szabályozó hatása viszonylag kis független tápponti feszültség-ingadozás esetén



9. ábra. A vonalban elhelyezett kétállású szabályozó hatása viszonylag nagy független tápponti feszültségingadozás esetén

amivel

$$k = \frac{1 - \frac{a}{b}}{2} \quad (12)$$

és

$$\frac{c}{b} = \frac{f}{b} = \frac{1 + \frac{a}{b}}{2}. \quad (13)$$

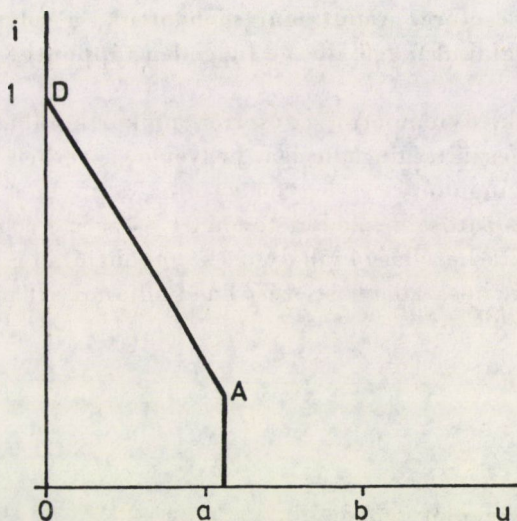
A két tartomány határa $a/b = 1/3$, ehhez a viszonyszámhoz tartozóan a szabályozási paraméterek a (8)÷(10) és (12), (13) összefüggésekből azonosan $k = 1/3$ és $f = c = 2/3b$. Végül ha $a/b \geq 1$, akkor $k = 0$, a szabályozó a táppontba kerül.

Visszatérve a 9. ábrára, a szabályozónak a közbenső E pontban is meg kell húznia, ha a feszültség és a terhelés egyidejűleg olyan, hogy a vonal végén a feszültségeltérés eléri az f értéket. Ha u az E pont feszültségkoordinátája és i a hozzátartozó viszonylagos terhelés, akkor fenti feltétel az alábbi alakban fogalmazható meg:

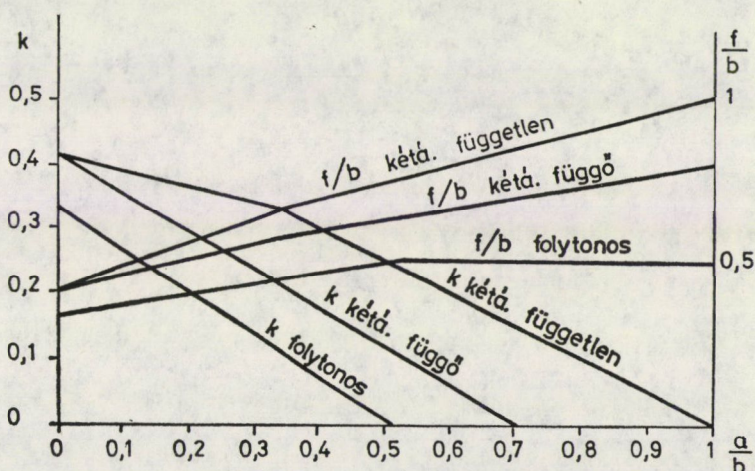
$$u + (1 - k)ib = f. \quad (14)$$

A szabályozásnak tehát mind a feszültséget, mind az áramot érzékelnie kell. A 10. ábra példaképpen $a/b = 1/2$ esetre bemutat egy ilyen meghúzási jellegű görbét.

Ha a szabályozó a táppontba kerül, minőségileg megváltozik a helyzet. A szabályozó bemeneti feszültsége nem jelenik meg a vonalon, tehát két kritikus hely marad a feszültségeltérés szempontjából, a táppont és a vonal vége. A vonal mentén jelentkező feszültségcsökkenést a táppontból nem lehet befolyásolni, lehet azonban a feszültség-egyenes táppont oldali végét ide-oda tologatni annak érdekében, hogy a nullavonalhoz képest szimmetrikusan helyezkedjék el. A táppont $2a$ feszültségingadozását a kétállású szabályozó felezi. A kétállású szabályozó csak egy irányba, gyakorlatilag mindig felfelé



10. ábra. Kétparaméteres szabályozás meghúzási jelleggörbéje



11. ábra. Összefüggő áttekintés a szabályozó k helyének és a legnagyobb f feszültségeltérésnek az alakulásáról a szabályozás módjától és a terheléstől függően

szabályoz, ezért a feszültségeltérések kívánatos szimmetrikus elhelyezkedését a nullavonal alkalmas eltolásával érhetjük el. Erre a tápponti transzformátor megcsapolásának az átkapcsolásával általában van mód.

Szimmetria esetén a kétállású szabályozóval elérhető feszültségeltérés a teljes feszültségingadozás fele, $f = (a + b)/2$. Itt van helye a finomabban lépcsőzött szabályozásnak, 3 fokozattal $f = a/3 + b/2$, általában n fokozattal $f = a/n + b/2$, folytonos szabályozással $f = b/2$.

A 11. ábra összefoglaló áttekintést nyújt k és f alakulásáról a/b függvényében a táppont függő, illetve független ingadozása és folytonos, illetve kétállású szabályozás esetére. Amint már mondtuk, a folytonos szabályozás menete egyformán alakul függő, illetve független tápponti feszültségingadozás esetében.

Végül szóljunk röviden arról az esetről, amikor kombináltan jelenik meg a táppont kétféle feszültségingadozása. Legyen a_1 a terheléssel arányos, a_2 a független feszültségingadozás és legyen $a_1 + a_2 = a$. Az a összes feszültségingadozás a legváltozatosabb módon tevődhet össze a két részből. A kombinálódás módja csak a kétállású szabályozó szempontjából érdekes. A számítás nem nehéz, de kicsit hosszadalmas, ezért hadd álljanak itt tájékoztatásul csak az eredmények.

1. Ha

$$0 \leq \frac{a_2}{b} - \frac{a_1}{3b} \leq \frac{1}{3},$$

akkor k az alábbi egyenlet gyöke:

$$k^2 + 2k \left(1 + \frac{2a_1 + a_2}{b} \right) - \left(1 - \frac{2a_1^2}{b^2} - \frac{2a_1a_2}{b^2} \right) = 0,$$

$$\frac{f}{b} = k + \frac{a_1 + a_2}{b},$$

$$\frac{c}{b} = 1 - k.$$

2. Ha

$$\frac{a_2}{b} - \frac{a_1}{3b} \geq \frac{1}{3} \quad \text{és} \quad \frac{a_1 + a_2}{b} \leq 1,$$

akkor

$$k = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a_1 + a_2}{b} \right),$$

$$\frac{f}{b} = \frac{c}{b} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{b} \right).$$

3. Ha

$$\frac{a_1 + a_2}{b} > 1,$$

akkor

$$k = 0,$$

$$\frac{f}{b} = \frac{c}{b} = a_1 + a_2.$$

Összefoglalóan a szekunder hálózatok szabályozására az alábbi irányelveket állapíthatjuk meg. Ha a szekunder hálózat feszültségigadozása kilép a tűrési sávból és a táppont feszültsége állandó, vagy nem tér el jobban névleges értékétől, mint a vonali feszültségigadozás fele, kétállású feszültségszabályozót kell a vonalba iktatni. Ha a táppont feszültségigadozása megközelíti vagy meg is haladja a vonali feszültségést, többfokozatú tápponti feszültségszabályozás alkalmazása indokolt. Ha a táppont terheléstől független feszültségigadozása csak $1 \div 2\%$ is, a szabályozó helyes működéséhez az áramot is érzékelni kell.

A szabályozó tényleges tervezésekor természetesen ki kell lépni egyszerűsítő feltevéseink köréből és számolni kell a vonal tényleges feszültség alakulásával, az elágazásokkal, a holsávval stb. Az egyszerűsítő tárgyalás azonban sokkal világosabbá teszi a lényegi összefüggéseket. A szabadesés törvényét sem taníthatnánk az iskolában, ha figyelembe kellene venni a légsúlylódást, az aerodinamikai hatásokat, a Coriolis-erőt és a gravitációs anomáliákat.

IRODALOM

AILLERET, P.: L'introduction de la mesure dans la notion de la qualité du service d'une distribution d'électricité et son intérêt au point de vue de la conception des réseaux, *Bull. SFE*, (1956)

Some Questions of Network Voltage Regulation. An important quality characteristic of electric energy supply is the network voltage. Keeping in the complicated distribution system everywhere within prescribed tolerances the voltages which change because of distance between production, constantly changing consumption and line voltage drops cannot be achieved without regulation. The system of voltage regulation follows the arrangement of the distribution system: the regulation cares for eliminating the voltage fluctuations on the place of production in the power stations, in the more important nodes of the H. T. and the Medium Tension networks and finally in some parts of the L. T. network. For this latter task the extremely simple two-step regulator is suitable from every point of view.

Einige Fragen der Netzspannungsregelung. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal der elektrischen Energieversorgung ist die Netzspannung. In einem komplizierten Verteilungssystem kann ohne Regelung nicht erzielt werden daß trotz der wegen der Entfernungen zwischen Produktions- und Verbrauchsstätten und der ständig wechselnden Belastungen in den Leitungen entstehenden Spannungsfälle die Spannungen überall im vorgeschriebenen Toleranzbereich bleiben. Das System der Spannungsregelung folgt dem Aufbau des Versorgungssystems: die Regelung besorgt die Kompensation der Spannungsschwankungen an der Produktionsstelle in den Kraftwerken, in den wichtigeren Knotenpunkten des Hoch- und des Mittelspannungsnetzes und schließlich in einzelnen Teilen des Niederspannungsnetzes. Für diese letztere Aufgabe entspricht in jeder Beziehung der außerordentlich einfache Zweipunktregler.