

## 2. Az együttműködő villamosenergia-rendszer teljesítmény-egyensúlya

### 2.1. A frekvencia és a hatásos teljesítmény közötti összefüggés

A fogyasztói alrendszerben a fogyasztók hatásos wattos teljesítményt, illetve egyes esetekben induktív meddőteljesítményt igényelnek. A villamosenergia-ellátás, pontosabban a villamosenergia-átvitel alapvető feladata hatásos (wattos) teljesítmény, illetve induktív meddőteljesítmény eljuttatása, szállítása fogyasztókhoz. A villamosenergia-rendszerben a hatásos wattos teljesítmény és a frekvencia között meghatározott kapcsolat van.

A rendszerszintű tervezés szempontjából meghatározó jelentőségű összefüggés az, amely a rendszerben együttműködő generátorok gépkapcsán leadott villamos teljesítmény és a hálózatba betáplált összes villamos teljesítmény között van. Eszerint:

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{gi}, \quad (\text{II.2-1.})$$

vagyis az adott villamosenergia-rendszerben a szinkronban járó generátorok gépkapcsain leadott villamos teljesítmények ( $P_{gi}$  [MW]) összege adja a rendszerbe táplált összes villamos teljesítmény ( $P_G$  [MW]) nagyságát. A villamosenergia-rendszerben szinkronban járó villamos generátorok száma  $n$  [-]. A mindenkori rendszerbe táplált villamos teljesítmény egy része az erőművi háziüzemi fogyasztások ( $P_{HÜ}$  [MW]) fedezésére, egy része a hálózati veszteségek fedezésére ( $P_V$  [MW]), ezen felüli része pedig a mindenkori fogyasztói villamos teljesítmény-igények ( $P_F$  [MW]) kielégítésére szolgál:

$$P_G = \sum_{i=1}^{i=n} P_{gi} = P_{HÜ} + P_V + P_F. \quad (\text{II.2-2.})$$

Az összefüggés szerinti esetben feltételezett, hogy nincs külső villamosenergia-betáplálás, vagy villamosenergia-kitáplálás az adott villamosenergia-rendszerben. A **(II.2-2.) összefüggés** a villamosenergia-rendszer teljesítmény-egyensúlyát fejezi ki. Értelemszerűen:

$$P_M = \sum_{i=1}^{i=n} P_{mi}. \quad (\text{II.2-3.})$$

Itt

$P_{mi}$  az  $i$ -edik generátort meghajtó mechanikai teljesítmény [MW];

$P_M$  a rendszer generátorait meghajtó mechanikai teljesítmények rendszerszintű összege [MW].

A **(II.2-3.) összefüggés** alapvető összefüggés, amely a villamosenergia-rendszer tranziens állapotaiban is, változó frekvencia esetén is érvényes. A villamos generátorok teljesítménye és az azokat meghajtó gőzturbinák tengelyteljesítménye között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$P_G + P_{VG} = P_M, \quad (\text{II.2-4.})$$

$$P_{VG} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{vgi}. \quad (\text{II.2-5.})$$

A **(II.2-4)** és a **(II.2-5) összefüggések** azt fejezik ki, hogy stabil üzemállapotban, vagyis ha a hálózati frekvencia állandó, vagy közel állandó és a generátorok teljesítménye nem változik, a gőzturbinák által a generátorok tengelyére átadott mechanikai teljesítmény ( $P_M$  [MW]) egyenlő a generátorok kapcsain mérhető villamos teljesítménnyel ( $P_G$  [MW]) és a generátorok veszteségének ( $P_{vgi}$  [MW]) rendszerszintű összegével ( $P_{VG}$  [MW]).

A **(II.2-2) összefüggés** szerinti egyensúly állapot fenntartása azt követeli meg, hogy a mindenkori fogyasztói teljesítményigénynek megfelelően változzon a rendszerbe táplált villamos teljesítmény. A cél az, hogy ez a teljesítmény-egyensúly a névleges frekvencián (egy adott tűréshatáron belül) valósuljon meg. A villamosenergia-rendszer üzemeltetésének alapvető feladata, hogy a fogyasztói villamos teljesítményigény megváltozását a generátornak átadott mechanikai teljesítmény változása kövesse.

$$P_M = P_G + P_{VG} = P_F + P_{HÜ} + P_V + P_{VG}. \quad (\text{II.2-6.})$$

Abban az esetben, ha a fogyasztói villamos teljesítményigény ( $P_F$  [MW]) változik, ugyanakkor e változást nem követi a generátor tengelyét meghajtó mechanikai teljesítmény ( $P_M$  [MW]) változása, akkor a villamosenergia-rendszer statikus energetikai egyensúlya megbomlik, s ennek következményeként a rendszer hálózati frekvenciája ( $f$  [Hz]) megváltozik.

$$P_{gi} = P_{mi} - \frac{dW_{ki}}{dt}. \quad (\text{II.2-7.})$$

A **(II.2-7.) összefüggésben** ([120]; 3-3. old.), amely elhanyagolja a generátor veszteségét:

$P_{gi}$  Az  $i$ -edik generátor villamos teljesítménye (generátorkapcsán mért teljesítménye) [MW];

$P_{mi}$  Az  $i$ -edik generátort meghajtó mechanikai teljesítmény [MW];

$\frac{dW_{ki}}{dt}$  az  $i$ -edik erőműegység forgó tömege kinetikus energiájának változása [MJ/s].

Az  $i$ -edik erőműegység forgó tömege kinetikus energiájának megváltozására vonatkozóan fennáll a következő összefüggés ([120]; 3-3. old.):

$$\frac{dW_{ki}}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2}\Theta_i\omega_i^2\right)}{dt} = \frac{\omega_i\Theta_i d\omega_i}{dt}. \quad (\text{II.2-8.})$$

A generátor teljesítménye (ebben az értelemben a „fékező teljesítmény”) és a meghajtó mechanikai teljesítmény közötti különbség a forgó tömegek lassulását ( $P_{gi} > P_{mi}$  esetben), vagy gyorsulását ( $P_{gi} < P_{mi}$  esetben) eredményezi. A **(II.2-8. összefüggésben**

$\Theta_i$  az i-edik turbina-generátor gépegység forgó tömegének tehetetlenségi nyomatéka [ $\text{kgm}^2$ ];

$\omega_i$  az i-edik turbina-generátor gépegység fordulatszámának megfelelő egyenértékű villamos körfrekvencia [ $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ].

$$T_i = \omega_i \Theta_i, \quad (\text{II.2-9.})$$

$$P_{gi} = P_{mi} - T_i \frac{d\omega_i}{dt}. \quad (\text{II.2-10.})$$

Itt

$T_i$  az i-edik turbina-generátor gépegység perdülete [ $\text{kgm}^2/\text{s}$ ].

Az együttműködő villamosenergia-rendszerben a generátorok  $n_0 = 3000$  1/min fordulatszámon üzemelnek,  $f_n = 50$  Hz névleges frekvencia esetén.

A rendszer összes forrásoldali perdületét ( $T_S$  [ $\text{kgm}^2/\text{s}$ ]) a

$$T_S = \sum_{i=1}^{i=n} T_i \quad (\text{II.2-11.})$$

összefüggés, míg az együttműködő villamosenergia-rendszer átlagos körfrekvenciáját ( $\omega_S$  [ $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ]) a

$$\omega_S = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \omega_i T_i}{T_S} \quad (\text{II.2-12.})$$

összefüggés határozza meg ([120]; 3-4. old.). Az átlagos rendszerfrekvencia meghatározható a

$$f_S = \omega_S / 2\pi \quad (\text{II.2-13})$$

egyenlet ([120]; 3-4. old.) alapján. Az átlagos rendszerfrekvencia úgy értelmezhető, hogy az átmeneti állapotokban az együttműködő villamosenergia-rendszer egyes pontjaiban mérhető frekvencia ezen átlagérték körül ingadozik. Állandósult rendszerállapotban a rendszer minden pontján

$$f = f_S. \quad (\text{II.2-14.})$$

A

$$P_G = P_M - T_S \frac{d\omega_S}{dt} = P_F + P_{H\ddot{U}} + P_V \quad (\text{II.2-15.})$$

összefüggésből láthatóan a forráshiány esetén az  $f_S$  [Hz] frekvencia lecsökkenhet, forrástöbblet esetén viszont ellenkező irányban térhet el névleges, tartandó értéktől.

## 2.2. Összefüggés a meddőteljesítmény és a feszültség között

A villamosenergia-rendszerben mindenekelőtt a túlgerjesztett erőművi generátorok, a statikus kondenzátortelepek a meddőteljesítmény forrásai, azonban a hálózati távvezetékek természetes kapacitása is meddőteljesítmény forrása. A fogyasztói alrendszerben a fogyasztói berendezések egy része nemcsak hatásos, hanem induktív meddőteljesítményt is igényel. A villamosenergia-rendszerben a hálózat egyes pontjain a feszültségcsökkentés céljára bekapcsolt söntfojtók meddőteljesítmény-fogyasztóként működnek, míg a teljesítmény-szállítás a távvezetékek és a transzformátorok soros induktív reaktanciáin meddőteljesítmény-vesztéséget okoz. A villamosenergia-rendszernek a meddőteljesítmény fogyasztókhöz juttatása is feladata. Mindazonáltal a meddőteljesítmény-szállítás hálózaton az áramerősséget növeli, s ennek megfelelően nő az  $RI^2$  veszteség és az induktív reaktanciájú soros ágakon a feszültségesés, ami miatt a rendszerbeli meddőteljesítmény-áramokat minimalizálni kell ([120]; 3-6. old.).

A villamosenergia-rendszerben a hálózati feszültségkülönbség meddőteljesítmény-áramlást eredményez. A feszültség emelése ugyanakkor a meddőteljesítmény-betáplálás növekedését vonja maga után, illetve a meddőbetáplálás növelése emeli a feszültséget.

A villamosenergia-ellátás során a rendszer fogyasztóinak  $P_{fi}$  [MW] wattos és  $Q_{fi}$  [var] „meddőteljesítmény-igényét” (meddőteljesítmény-felvételét)  $f_n$  [Hz] névleges frekvencián és a fogyasztói csatlakozási pontokon  $U_{fi}$  [V] névleges feszültségen kell kielégíteni, értelemszerűen a megengedett eltérési tőrés határon belül. A rendszerszintű tervezés szempontjából lényeges azonban annak kiemelése, hogy a hálózati alrendszer egyes pontjain a feszültség a névleges értéktől különböző mértékben eltérhet, a mindenkori terhelési viszonyoktól függően. Ez azt jelenti, hogy a feszültség nem tekinthető a villamosenergia-szolgáltatás olyan rendszerszintű jellemzőjének, mint a frekvencia.

A rendszerre vonatkozóan fennállnak a következő összefüggések ([120]; 3-6. old.):

$$Q_G = \sum_{i=1}^{i=n} Q_{gi}, \quad (\text{II.2-16.})$$

$$Q_F = \sum_{j=1}^{j=m} Q_{fj}, \quad (\text{II.2-17.})$$

$$Q_C = \sum_{k=1}^{k=p} Q_{ck}. \quad (\text{II.2-18.})$$

Az összefüggésekben:

- $Q_G$  a generátorkapcsokon kiadott meddőteljesítmények rendszerszintű összege [var];
- $Q_{gi}$  az  $i$ -edik generátorkapcsokon kiadott meddőteljesítmény [var];
- $Q_F$  a fogyasztók által felvett összes meddőteljesítmény [var];
- $Q_{fj}$  a  $j$ -edik fogyasztó által felvett meddőteljesítmény [var];
- $Q_C$  a rendszerszintű meddőteljesítmény [var];
- $Q_{ck}$  a  $k$ -adik helyi meddőteljesítmény-forrás teljesítménye [var].

A fentiek azt jelentik, hogy a villamosenergia-rendszer együttműködő erőműveinek generátorkapcsain mért kiadott villamos teljesítmények ( $P_{gi}$  [MW]) együttesen adják a rendszerbe táplált összes teljesítményt ( $P_G$  [MW]), míg a rendszer fogyasztói által felvett

villamos meddőteljesítmények ( $Q_{ji}$  [var]) együttesen a rendszerszintű (fogyasztók által felvett) teljesítményt ( $Q_F$  [var]) adják. A meddőteljesítmény-források teljesítménye ( $Q_{ck}$  [var]) is összegezhető rendszerszinten.

## II. RÉSZ, 2. FEJEZET

### 6

#### A,Á

átlagos rendszerfrekvencia ..... 3

#### E,É

erőművi háziüzemi fogyasztás ..... 1

#### F

fékező teljesítmény ..... 2

fogyasztói villamos teljesítményigény ..... 1, 2

frekvencia ..... 1, 2, 3

#### G

generátorveszteség ..... 2

#### H

hálózati veszteség ..... 1

hatásos (wattos) teljesítmény ..... 1

#### I,Í

induktív meddőteljesítmény ..... 1

#### M

mechanikai teljesítmény ..... 2

meddőteljesítmény forrásai ..... 4

meddőteljesítmény-áramlás ..... 4

meddőteljesítmény-betáplálás ..... 4

meddőteljesítmény-felvétel ..... 4

meddőteljesítmény-fogyasztók ..... 4

meddőteljesítmény-igény ..... 4

#### T

turbina-generátor gépegség perdülete ..... 3

#### V

villamos körfrekvencia ..... 3

villamosenergia-átvitel alapvető feladata ..... 1

villamosenergia-rendszer átlagos körfrekvenciája ..... 3

villamosenergia-rendszer statikus energetikai egyensúlya ..... 2

villamosenergia-rendszer teljesítmény-egyensúlya ..... 1

villamosenergia-rendszer üzemeltetésének alapvető feladata ..... 2