

Villamos gépek

A villamos gépek működésének alapelvei

A villamos gépekben - generátorokban, motorokban és transzformátorokban egyaránt - feszültség indukálódik. A generátorban indukált feszültségről tápláljuk a fogyasztókat, a motorban indukált feszültség egyensúlyt tart a motort tápláló hálózat feszültségével.

A villamos gépek - a transzformátor kivételével - mozgó, leggyakrabban forgó alkatrészeket tartalmaznak. E mozgás erő, illetve nyomaték hatására létesül. A villamos motorok ezt a nyomatékot maguk létesítik, a generátorokat hajtógép forgatja nyomatéka segítségével.

A következőkben megismerkedünk a villamos gépekben indukált feszültségekkel és a létrejövő nyomatékokkal.

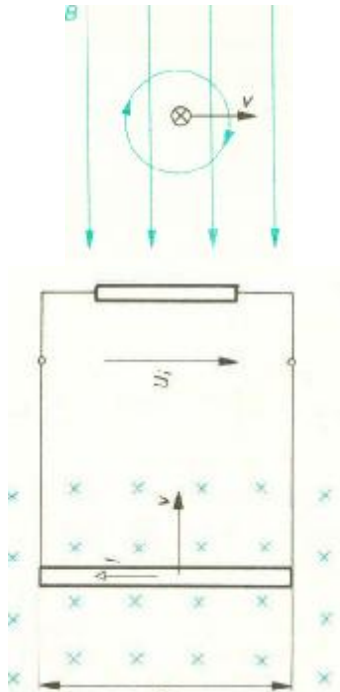
Az indukált feszültség

A villamos gépekben a mozgási és a nyugalmi elektromágneses indukció írtján indukálódik feszültség.

Ha a mágneses térben mozgó vezető indukcióvonalakat metsz, akkor benne feszültség indukálódik. Ez a jelenség a mozgási elektromágneses indukció. Ha l m hatásos hosszúságú vezető B Vs/m² mágneses indukciójú térben az indukcióvonalakra merőlegesen v m/s sebességgel mozog, akkor az indukált feszültség voltokban

$$U_i = Blv.$$

Az 1 ábra a mágneses tér indukcióvonalait és a mozgó vezetőket két nézetben mutatja. A kereszttek távolodó irányú indukcióvonalakat jelentenek, az alsó ábra a felső felülnézete.



Ha a mozgó vezető két végére - mint az ábrán látható fogyasztót kapcsolunk, vagy rövidre zárjuk, akkor áram indul meg. Az áramirány *Lencz törvénye* segítségével állapítható meg: az indukált feszültség által létesített áram olyan irányú, hogy hatásával gátolja az indukáló okot. Az indukáló ok a vezető mozgása. Az áram maga körül olyan irányú

Villamos gépek

indukcióvonalakat kell létesítsen, amelyek az eredeti tér indukcióvonalait a mozgás irányában (az ábrán a vezető jobb oldalán) sűrítik. Az indukcióvonalak iránya tehát az óramutató járásával kell megegyezzen. Ilyen irányú indukcióvonalakat távolodó irányú áram hoz létre. Ezt tüntettük fel az 1. ábrán. Ebből már következik az indukált feszültség iránya. A feszültség irányát kétféleképpen változtathatjuk meg: az indukcióvonalak vagy a mozgás irányának megváltoztatásával. Mindkettő egyidejű megváltoztatása esetén az indukált feszültség iránya nem változik.

Forgó villamos gépekben nem egyetlen vezeték mozog egyenes pályán, hanem tekercs forog.

Ha egy tekercsben változik a mágneses indukcióvonalak száma (a mágneses fluxus), akkor a tekercsben feszültség indukálódik. Ez a jelenség a nyugalmi elektromágneses indukció. Ha egy menetben Δt idő alatt $\Delta\Phi$ a fluxusváltozás, akkor az indukált feszültség voltokban:

$$U_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

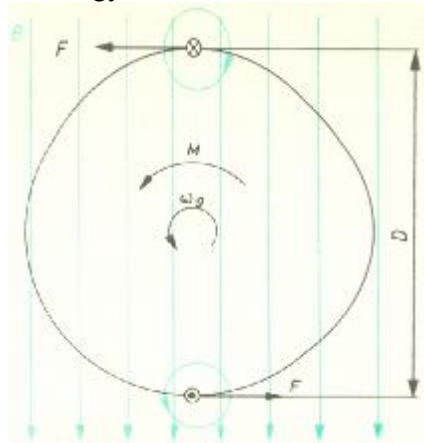
Ha a fluxusváltozás N menetszámú tekercsben játszódik le, akkor az indukált feszültség:

$$U_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

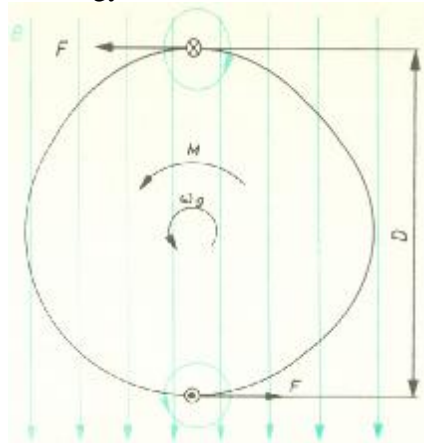
A tekercsben lejátszódó fluxusváltozás az idő függvényében gyakran szinuszos. Az indukált feszültség a fluxushoz képest 90° -ot siet.

A nyomaték

A villamos forgógépek nyomatékát mágneses mező és áramot vivő vezeték hozzák létre. A mágneses mezőt a gép álló- vagy forgórésze létesítheti, az áramot vivő vezeték - ennek megfelelően - lehet a forgórészen vagy az állórészen.



Villamos gépek nyomatékának keletkezése

A nyomaték létrejöttének egyszerűsített ábrázolását láthatjuk a  ábrán. A gép állórésze B Vs/m² mágneses indukciójú homogén mágneses teret létesít. A forgórészen két l m hatásos hosszúságú vezeték van. Az I A áramerősség a két vezetékben ellentétes irányban folyik. Az indukcióvonalak sűrűsödése alapján megállapítható a vezetékekre ható erők iránya. Nagyságuk N -ban:

Villamos gépek

$$F = BI l$$

A két erő erőpárt alkot, tehát nyomatékot létesít. Ha a két vezető távolsága D akkor a nyomaték Nm -ben:

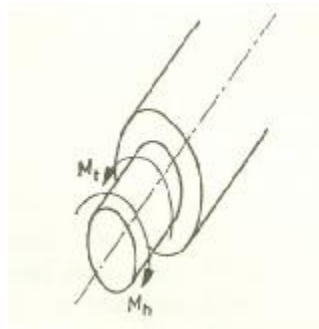
$$M = FD$$

A gép szögsebességét ω -val jelölve, a teljesítmény W -ban:

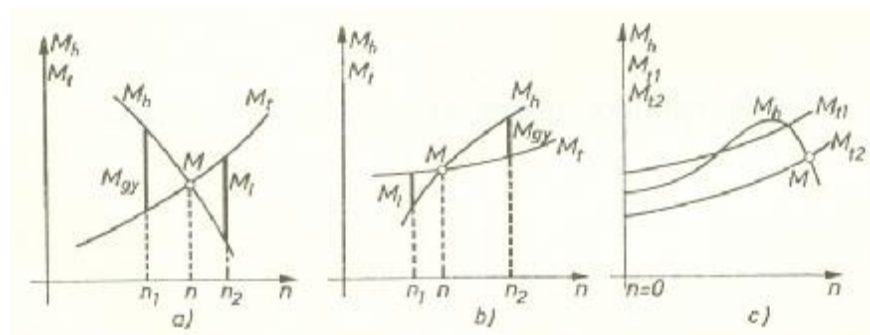
$$P = M\omega$$

A villamos forgógépek kifejthetnek *hajtó nyomatékot* (M_h), de jelenthetnek *terhelő nyomatékot* is (M_t). Ha a gép hajtó nyomatékot fejt ki, akkor általában hat a tengelyére ellentétes irányi! terhelő nyomaték is. Ha a villamos gép jelenti a terhelő nyomatékot, akkor hajtó nyomatékkal kell a tengelyét forgatni. A gép tengelyére tehát mindenképpen két ellentétes irányú nyomaték hat (...ábra). Ha $M_h = M_t$ akkor a gép áll vagy állandó fordulatszámmal forog. Ha $M_h > M_t$ akkor a gép gyorsul, ha $M_h < M_t$ akkor a gép nem indul meg, ill. ha már forog, akkor a nagyobb terhelő nyomaték hatására lassul.

A forgó villamos gépek működési elvétől függően különbözőképpen változhat a gépek nyomatéka a fordulatszám függvényében. Ugyanígy különböző lehet a villamos gépeket hajtó vagy terhelő nyomaték fordulatszám függése is.



A hajtó- és a terhelő nyomaték



Munkapontok: a) stabilis, b) labilis, c) M_{t1} nyomatékkal a motor nem tud megindulni, M_{t2} -vel az M munkapont alakul ki

A ...-a ábrán megrajzoltuk egy gép tengelyére ható hajtó és terhelő nyomaték $M_h = f(n)$ és $M_t = f(n)$ függvényét. Bár mindkét nyomaték metszékeit a vízszintes tengely fölé rajzoltuk, hogy világosan lássuk egymáshoz viszonyított nagyságukat, azért tudjuk, hogy a két nyomaték ellentétes irányú.

Ha $n_1 < n$ fordulatszámmal jár a gép, akkor $M_h = M_t$, a gépre

$$M_{gy} = M_h - M_t$$

gyorsító nyomaték hat, mely a gép fordulatszámát n -ig növeli, ahol $M_h = M_b$, azaz gyorsító nyomaték nincs ($M_{gy} = 0$), a gép fordulatszáma ebben az úgynevezett munkapontban (M) állandósul. Ha a gép fordulatszáma $n_2 > n$, akkor $M_h < M_b$, a gépre

$$M_l = M_h - M_t$$

lassító nyomaték hat (M_t és M_{gy} ellentétes előjelű és irányú), mely a gép fordulatszámát n -ig csökkenti. Tehát minden körülmények között a gép az M munkapontban üzemel, onnan valamilyen hatással kimozdítva és a hatást megszüntetve, oda megint visszatér. *Ez a stabilis munkapont. Stabilis a munkapont, ha a munkaponthoz tartozó fordulatszámnál kisebb fordulatszámon $M_h > M_t$ nagyobb fordulatszámon $M_h < M_t$.*

Nem stabilis, úgynevezett *labilis munkapontot* mutat a b ábra. $n_1 < n$ fordulatszámon $M_h < M_t$ lassító nyomaték lép fel, mely a gép fordulatszámát csökkenti. Ha a nyomatéki görbék kisebb fordulatszámon már nem találkoznak, akkor a gép megáll $n_2 > n$ fordulatszámon $M_h > M_t$, gyorsító nyomaték lép fel, mely a gép fordulatszámát növeli és ha a nyomatéki görbék nagyobb fordulatszámokon már nem találkoznak, akkor a fordulatszám --- ha valamilyen biztonsági berendezés ebben nem gátolná meg, vagy a gép nem hibásodna meg -- minden határon túl növekedne. Ezt a jelenséget nevezzük *megszaladásnak*. Labilis munkaponttal a gép nem tartható üzemben, mert bármilyen kis külső hatásra a gép kimozdulhat a munkapontból és máris bekövetkezik az előbb leírt egyik vagy másik jelenség.

A c ábrán $n = 0$ fordulatszámon, azaz álló állapotban $M_{t1} > M_h$ a gép nem tud megindulni. Ha a terhelő nyomatékot álló állapotban M_{t2} -re csökkentjük, akkor a gép megindul és az M stabilis munkapontig felgyorsul.

A villamos gépek veszteségei és hatásfoka

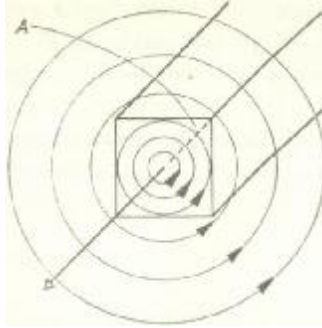
Minden gépben, tehát a villamos gépekben is keletkeznek veszteségek. Ezek miatt a gép hasznosított teljesítménye (P_h) mindig kisebb a gépbe bevezetett (P_b) teljesítménynél.

Tekercsveszteség a gép tekercseiben jön létre:

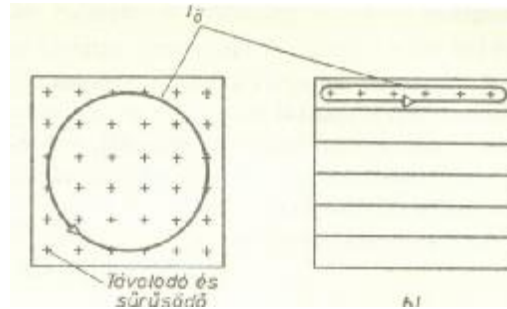
$$P_t = I^2 R,$$

ha R ellenállású tekercsen áramerősség folyik. Ha a gépben több tekercs van, akkor külön-külön ki kell számítani mindegyikben a tekercsveszteségeket és összegezni kell azokat. Szokás a tekercsveszteséget rézveszteségnek is nevezni.

Járuelkos tekercsveszteség akkor jön létre, ha a tekercs vezetőiben váltakozó áram folyik (B.8 ábra). Ez a vezető belsejében és a vezető körül váltakozó mágneses teret létesít, melynek indukcióvonalai periódusonként kétszer irányt változtatnak. A vezető belsejét több váltakozó indukcióvonal veszi körül mint a széleket, ezért a vezető belsejében nagyobb az önindukciós feszültség s Lenc törvénye értelmében ez ott jobban akadályozza az áram folyását mint a



Járulékos tekercsveszteség
Kialakulása



Az örvényáram veszteség kialakulása és
csökkentése lemezeléssel

széleken. Ez azt jelenti, hogy a vezető belsejének nagyobb az induktív reaktanciája, az áram a vezető belsejéből a felület felé szorul: a széleken nagyobb az áramsűrűség mint közepén. Olyan a helyzet mintha az áram nem folyna a vezető teljes A keresztmetszetén, tehát mintha a vezető ellenállás megnövekedne. Az I^2R összefüggés értelmében ez veszteségnövekedést jelent. A járulékos tekercsveszteség főleg akkor számottevő, ha a négyzet keresztmetszetű vezető nagyobbik mérete a 10 mm-t meghaladja és a frekvencia több mint 50 Hz.

Vasvesztés a gép olyan vas alkatrészeiben jön létre, amelyekben a mágneses indukció változik. Két részből áll: átmágnesezési és örvényáram veszteségből.

A vasat úgy tekinthetjük, hogy az elemi mágnesekből vagy elemi köráramokból áll. Ezek tengelyei igyekeznek beállni az indukcióvonalak irányába. A váltakozó indukcióvonalak irányának követése belső súrlódással jár, ez hőt fejleszt. Ezt nevezzük *átmágnesezési* vagy *hiszterézisvesztésnek*. Arányos a vas súlyával, a frekvenciával, a mágneses indukció maximumának négyzetével és függ a vas minőségétől. Nagyobb mennyiségű vasban természetesen több veszteség jön létre. A hiszterézis veszteség azért arányos a frekvenciával, mert nagyobb frekvencia esetén a vasban az elemi mágnesek másodpercenként a frekvenciával arányosan többször súrlódnak egymáson. A mágneses indukció négyzetétől való függést mérésekkel bizonyították. A hiszterézis veszteség szilícium ötvözéssel csökkenthető.

A váltakozó mágneses indukció nemcsak a tekercsek vezetőiben, hanem a gépek vas testében is indukál feszültséget és ez a vastestben - mint egy rövidrezárt menetben - áramot (ún, örvényáramot) indít, mely hőt fejleszt. Ez az örvényáramvesztés. Tömör vastest metszete látható aábrán, ahol megrajzoltuk az indukcióvonalakat és az I_0 örvényáramot.

Az örvényáramvesztés csökkentése a vas lemezelésével és szilícium ötvözéssel történik. A lemezzavastagság 0,35 vagy 0,5 mm. A lemezeket egymástól vékony lakk vagy keramikus réteggel szigeteljük. Síkjuk az indukcióvonalakkal párhuzamos, hogy a lemezek közötti szigetelés ne okozzon mágneses ellenállás növekedést. A szilícium ötvözés 0,2...4,5%-os.

A vas lemezelésével nő a vas $R = \rho l/A$ ellenállása, hiszen nő az örvényáramok útja, mert az mindegyik lemezben folyik és csökken A , a lemez keresztmetszete. A szilícium ötvözés növeli a vas fajlagos ellenállását, tehát ez is növeli a vas ellenállását.

Az örvényáramvesztés arányos a vas súlyával, valamint a frekvenciának, a vas méretének és a mágneses indukció maximumának négyzetével. Függ a vas minőségétől is. Nagyobb súlyú vasban természetesen több örvényáram veszteség keletkezik. A vasban indukált feszültség annál nagyobb, mennél nagyobb a frekvencia, mert nagyobb frekvencián gyorsabban váltakoznak az indukcióvonalak; annál nagyobb, mennél nagyobb a vas mérete, mert nagyobb a vas hatásos hossza; annál nagyobb, mennél nagyobb az indukció.

Villamos gépek

A vasvesztés számítása érdekében a vasanyagokra megadják a v_{10} *vesztési számot*. Ez a szám megmutatja, hogy 50 Hz frekvenciával szinuszosan váltakozó 1 Vs/m^2 - maximális értékű mágneses indukció esetén hány W vesztés jön létre 1 kp vasban. Különböző vastagságú, szilíciumtartalmú és különböző technológiával készült vaslemezek vesztési száma pl. 3,6; 2,3; 1,1 ; 0,7 W; kg.

Járulékos vasvesztés azokban a vas gépalkatrészekben jön létre, ahol a mágneses indukció a gép névleges frekvenciájánál nagyobb frekvenciával váltakozik. A gép névleges frekvenciája az a frekvencia, amire a gép készült.

A kefék átmeneti vesztését nem a kefe és az alatta futó felület közötti átmeneti ellenállásból számítjuk, mert az változik, hanem az átmeneti ellenálláson létrejövő és egy adott gépnél nagyjából állandó $U = 0,4 \dots 1 \text{ V}$ feszültségből a

$$P_{\text{kefe}} = I U_{\text{kefe}}$$

képlet alapján, ahol I a kefén átfolyó áram.

Forgó villamos gépekben hőt fejleszt, tehát vesztésget létesít a csapágy- és légsúrlódás. Ez a **súrlódási** vesztés. Légsúrlódást nemcsak a forgórész létesít, hanem a forgórészre, vagy külön szerelt szellőzők is.

A gép hatásfoka

$$\eta = \frac{P_h}{P_b}$$

A generátor villamos teljesítményt hasznosít, a bevezetett teljesítmény mechanikai: $P_h = P_{\text{vill}}$, $P_b = P_{\text{mech}}$. A villamos teljesítmény könnyen mérhető műszerekkel, a mechanikai teljesítmény mérése viszont nehézkes. Könnyebb számítással vagy méréssel meghatározni a vesztések összegét (P_v). A $P_b = P_h + P_v$ összefüggést $P_{\text{mech}} = P_{\text{vill}} + P_v$ alakban alkalmazva

$$\alpha = \frac{P_{\text{vill}}}{P_{\text{vill}} + P_v}$$

A számlálót és a nevezőt P_{vill} - el végigosztva a gyakorlatban használatos

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{P_v}{P_{\text{vill}}}}$$

összefüggést kapjuk a generátor hatásfokára.

A motor mechanikai teljesítményt hasznosít, a bevezetett teljesítmény villamos: $P_h = P_{\text{mech}}$, $P_b = P_{\text{vill}}$. Itt is olyan hatásfok képletet igyekszünk nyerni, amelyikben nem szerepel a mechanikai teljesítmény. A $P_h = P_b - P_v$ összefüggést $P_{\text{mech}} = P_{\text{vill}} - P_v$ alakban alkalmazva

$$\eta = \frac{P_{\text{vill}} - P_v}{P_{\text{vill}}}$$

P_{vill} -al egyszerűsítve a gyakorlatban használatos $\eta = 1 - \frac{P_v}{P_{\text{vill}}}$ összefüggést kapjuk a motor hatásfokára.

Átalakítók esetében mind a bevezetett, mind a hasznosított teljesítmény villamos:

Villamos gépek

$$\eta = \frac{P_{\text{h vill}}}{P_{\text{b vill}}}$$

$P_{\text{h vill}}$ és $P_{\text{b vill}}$ egymáshoz nagyon közelálló érték. Bármelyik meghatározásánál elkövetett kis hiba már nagy mértékben befolyásolja a kiszámított hatásfok pontosságát. Ezért csak az egyik villamos teljesítményt határozzák meg közvetlenül, a másikat a veszteségek segítségével. Ha pl. a $P_{\text{h vill}}$ -t határozzák meg közvetlenül, akkor $P_{\text{b vill}} = P_{\text{h vill}} + P_v$, és ebből a hatásfok

$$\eta = \frac{P_{\text{h vill}}}{P_{\text{h vill}} + P_v} = \frac{1}{1 + \frac{P_v}{P_{\text{h vill}}}}$$

A fellépő veszteségek hatására a gép melegszik, hűtésről kell gondoskodni. A veszteségek rontják a gép hatásfokát. Csökkenteni lehetne a gép melegedését, esetleg hűtésről se kellene gondoskodni és a hatásfok is javulna, ha olyan gépeket készítenének, amelyekben kevés a veszteség. A tekercsveszteség kis ellenállású, tehát nagy keresztmetszetű vezetővel csökkenthető. A vasveszteség csökkentése B_m csökkentésével érhető el, de ennek érdekében nagy vaskeresztmetszetet kell alkalmazni, hogy a szükséges fluxus kialakulhasson. Mindez azt mutatja, hogy a kis veszteségű gép nagy méretű lesz és ezért lesz drága. Általában gazdaságosabb kisebb, de veszteségesebb gépeket készíteni és levegő, hidrogén, olaj vagy víz hűtéssel (esetleg többféle hűtés kombinációjával) gondoskodni arról, hogy a gép alkatrészei sehol se lépjenek túl a szabvány által előírt megengedett hőmérsékletet. Ez a hőmérséklet a géptől, egyes alkatrészeitől és az alkalmazott szigetelőanyagtól függően elérheti, sőt meg is haladhatja a 100 °C-ot.

A melegedés hatására a szigetelőanyagok fokozatosan tönkremennek, öregsznek. Ez befolyásolja a gép élettartamát, de még akkor is gazdaságosabb nagyobb veszteségű gépet készíteni, ha a gépet 10-15 évenként át kell tekercselni.