

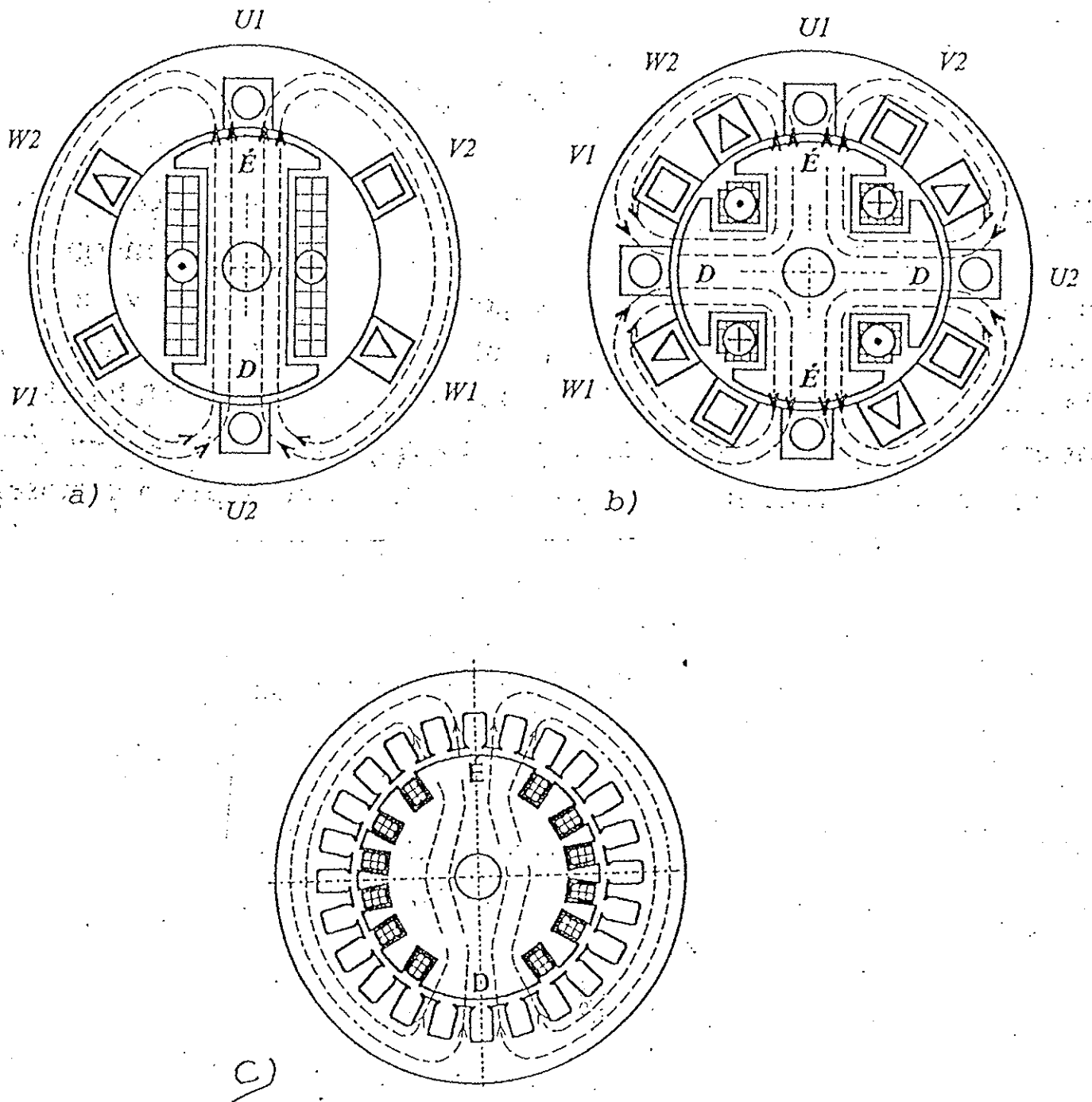
4. Szinkrongenerátor villamos üzeme

A villamos energia termelése szinte kizárólag háromfázisú szinkrongenerátorokkal történik. Feltételezve, hogy a szinkrongépek működési elve ismert, bevezetésként csak néhány, a villamos üzem szempontjából lényeges gondolatot idézünk fel, arra törekedve, hogy minél egyszerűbb tárgyalási módot alkalmazhassunk.

A szinkrongenerátorok forgórészében (rotor) egyenárammal gerjesztett, ún. pólus tekercselés van elhelyezve, a forgórésztekercsek száma adja az észak-dél póluspárok számát. Az állórészbe (sztátor) a póluspárok számának megfelelő, szimmetrikus, háromfázisú tekercselést építenek. A forgórészt mechanikai teljesítményt leadni képes erőgép (turbina) hajtja. A turbina-generátor egység tengelyének ω_m mechanikai körfrekvenciája (szögsebessége) és az ω villamos szinkron körfrekvencia között a p póluspárok száma teremti a kapcsolatot: $\omega_m = \omega / p$. A tengely n fordulatszáma és az f villamos szinkron frekvencia között az összefüggés: $n = 60 f / p$ (1/perc), 50 Hz-es hálózati szinkron frekvencia mellett a lehetséges szinkron fordulatszámok: 3000, 1500, 1000, 750, ... 1/perc. A gőzturbinák által hajtott szinkrongenerátorok általában egy forgórész-tekercseléssel készülnek, tehát $p = 1$ (azaz kétpólusúak). Az egy póluspárú gépek forgórésze a nagy fordulatszám miatt hengeres kialakítású, a pólustekercs a tömör acél forgórészbe mart hornyokban helyezkedik el. A kisebb fordulatszámra készült, 1-nél nagyobb póluspár számú gépek forgórésze a pólustekercsek beépítésére alkalmasan kiképzett (és általában lemezelt vastestű), az állórésztekercselés egyes fázisai is a póluspárok számának megfelelően osztottak és elhelyezettek.

A pólustekercselés, ill. kiképzés következtében a szinkrongépek forgórésze mágneses szempontból aszimmetrikus, ezért a gépben kialakuló fluxuskép jellemzésére mágnesezési irányokat kell megadni. A gerjesztőáram mágnesezési iránya - az ún. hosszirány - a szokásos jelöléssel a d (direct) irány, az erre merőleges ún. keresztirány jele q (quadrature). A mágneses aszimmetria a hengeres forgórészű gépeknél is jelen van, azonban ennek hatása nem jelentős.

Az álló- és forgórésztekercslés elvi szerkezeti kialakítását a 4.1-1 ábra szemlélteti (az a - b - c fázisokat rendre az U - V - W jelöli).



4.1-1 ábra Szinkrongenerátor álló- és forgórész elvi kialakítása

a) kétpólusú gép ($p=1$) b) négypólusú gép ($p=2$) c) hengeres forgórész

A turbina által forgatott, egyenárammal átjárt forgórésztekercs gerjesztése az állórész tekercselésében szimmetrikus háromfázisú feszültséget indukál. Az állórésztekercseket szimmetrikus háromfázisú áramkörbe kapcsolva az állórésztekercselésben szimmetrikus háromfázisú áram folyik, amelynek eredő térbeli gerjesztése a forgórésszel szinkron forgó mezőt hoz létre. A forgórésszel együtt forgó koordináta rendszerben vizsgálva a forgórészáram által létrehozott gerjesztés, az állórészáramok eredő gerjesztése és az eredő forgó mágneses mező álló helyzetű. Ha a szinkrongenerátor a kapcsain hatásos villamos teljesítményt szolgáltat, akkor a forgórészből származó gerjesztés és az eredő mágneses mező térvektora egymással szöget zár be. A kapcsokon leadott hatásos villamos teljesítménynek megfelelő nyomaték a forgórészt fékezi, a fékező hatást a turbinának a közös tengelyre kifejtett mechanikai hajtó nyomatékkal, ill. az ennek megfelelő mechanikai teljesítménnyel kell ellensúlyoznia. A szinkrongenerátor hatásos háromfázisú villamos teljesítménye (a veszteségektől eltekintve) tehát állandó fordulatszám esetén a turbina teljesítményével egyezik meg. Változó terhelés, pontosabban változó állórészáram mellett a kapocsfeszültség állandó (névlegeshez közeli) értéken tartása csak a forgórész gerjesztőáramának folyamatos szabályozásával érhető el.

Ebben a fejezetben a szinkrongenerátor villamos paramétereivel és modellezésével, állandódult üzemállapotaival, azok változásainak, ill. a szabályozásoknak a hatásaival, a generátor villamos transzienseivel, a gerjesztésszabályozók alapkérdéseivel foglalkozunk. Leírásunkban előtérbe helyezzük a fizikai jellegű megközelítést és a VER üzeme szempontjából is fontosnak mondható témaköröket, továbbá csak a szimmetrikus állapotokat tárgyaljuk és csak az alapharmonikus fázorokkal kezelhető mélységben. A konstrukciós kérdéseket csak az üzemtan szempontjából szükséges módon, érintőlegesen említjük.

Az egyes összefüggésekben szereplő áramok, feszültségek, teljesítmények fázisértékek, vagy a mennyiségek viszonylagos egységben értendők.

4.1 Szinkrongenerátor állandósult üzeme

A szinkrongenerátor üzemét akkor tekintjük állandósult állapotúnak, ha fordulatszáma és gerjesztőárama állandó. A következőkben jellegzetes üzemállapotokat, ill. változásokat tekintünk át, de ezek kialakulásának folyamatát most nem vizsgáljuk.

4.1.1 Jelleggörbék, paraméterek, modellek

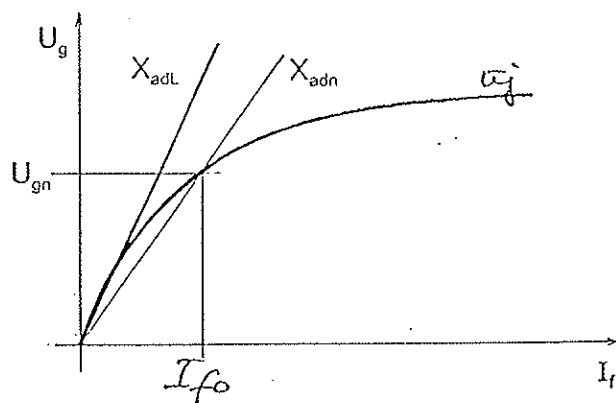
4.1.1.1 Üresjárási (mágnesezési) jelleggörbe

A szinkrongenerátor üresjárási állapotában a gép a névleges fordulatszámaival forog, az állórésztekercsekben nem folyik áram ($I_g=0$), az U_g kapocsfeszültség az állórészben indukált U_l légrésfeszültséggel egyezik meg ($U_g = U_l$), amelynek nagysága a forgórész egyenáramú I_f gerjesztésével állítható be (a mágneses remanenciát elhanyagoljuk):

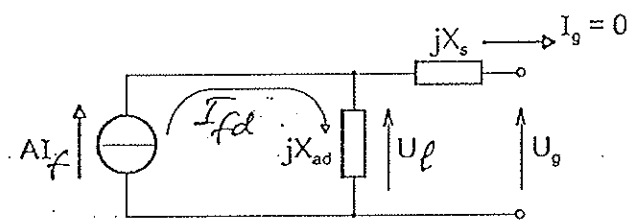
$$U_g = \omega \Psi_g = \omega L_{ad} A I_f = X_{ad} I_{fd} \quad (4.1-1)$$

A képletben U_g az állórészben indukált fázisfeszültség effektív értéke, Ψ_g az állórészszel kapcsolódó fluxus ($I_g=0$ esetén megegyezik a Ψ_l légrésfluxussal), $X_{ad} = \omega L_{ad}$ az állórész és a forgórész közötti mágneses csatolást reprezentáló ún. d irányú főmező reaktancia, A az állórész és a forgórész közötti áram-átszámítási tényező (a forgórész egyenáram és az ezzel egyenértékű állórészbeli fiktív váltakozó áram effektív értéke közötti átszámítási faktor), $I_{fd} = A I_f$ a forgórészáram állórészre átszámított értéke.

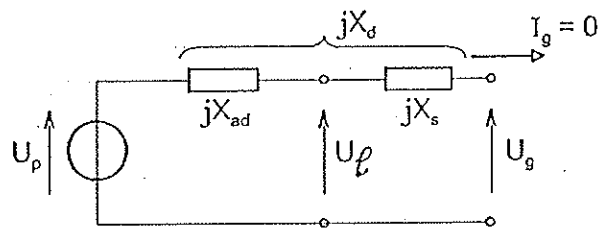
Az I_f áramot változtatva, méréssel meghatározható a szinkrongép $U_g(I_f)$ üresjárási jelleggörbéje (4.1-2a ábra), ami a forgórész és állórész vastest mágneses telítődése miatt nemlineáris jellegű, tehát az X_{ad} főmező reaktancia az I_f függvényében folyamatosan változik (növekvő I_f -nél X_{ad} csökken). Telítetlen értéke X_{adL} , amely a mágnesezési görbe kezdeti (lineáris) szakaszára jellemző. A névleges U_{gn} fázisfeszültséghez az I_{f0} üresjárásban szükséges gerjesztés tartozik, a mágnesezési görbe ezen pontjához az X_{adn}



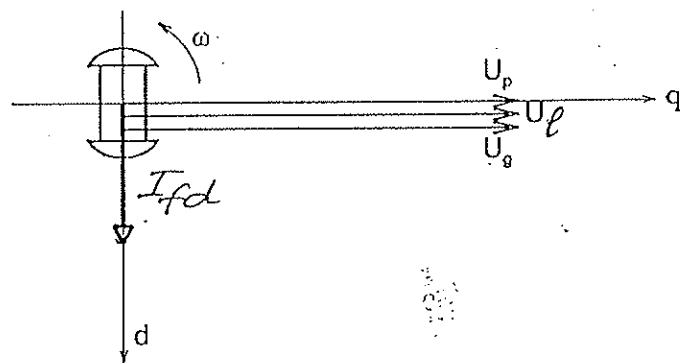
a)



b)



c)



d)

4.1-2 ábra Szinkrongenerátor állandósult üresjárási állapotban

- a) üresjárási jelleggörbe
- b) áramgenerátoros modell
- c) feszültséggenerátoros modell
- d) üresjárási fazorábra

reaktanciát rendeljük, amelyet a továbbiakban a főmező reaktancia telített értékének tekintünk. A jelleggörbe kezdeti lineáris U_L szakaszára, ill az U_{gn} névleges feszültségre tehát írható:

$$U_L = X_{adL} A I_f \quad U_{gn} = X_{adn} A I_{fo} \quad (4.1-2)$$

A 4.1-2b ábrán a szinkrongép áramgenerátoros üresjárási modellje látható. Az állórészt a generátor U_g kapocsfeszültsége és az U_l légrészfeszültség közötti X_s (üresjárásban árammentes) szórási reaktanciával jellemezzük, az állórész tekercselés R_a ohmos ellenállása elhanyagolható. A 4.1-2c ábra a feszültséggenerátoros modellt mutatja, amely az áramgenerátoros modell generátorkapcsokra nézve) egyenértékű átalakításával határozható meg. A modell forrásfeszültsége a fizikailag nem mérhető

$$U_p = X_{ad} I_{fd}$$

ún. pólusfeszültség, amely a forgórész gerjesztésének hatását veszi figyelembe az állórészre vonatkozó gépmodellben (U_p értékét nem csak az I_f , hanem a telítődő X_{ad} is befolyásolja) és a szinkrongép állandósult állapotára jellemző X_d szinkron reaktancia mögötti feszültségként értelmezhető. A d irányú szinkron reaktanciát

$$X_d = X_{ad} + X_s$$

szerint definiáljuk, telítetlen, ill. telített értéke:

$$X_{dL} = X_{adL} + X_s \quad ; \quad X_{dn} = X_{adn} + X_s \quad (4.1-3)$$

A 4.1-2d ábra az üresjárásban érvényes, a forgórészszel együtt forgó koordináta rendszerben megrajzolt U - I fázorábrát mutatja. Az $U_g = U_l = U_p$ feszültség a d irányú gerjesztéshez képest 90° -ot siet, tehát q irányú.

4.1.1.2 Rövidzárási jelleggörbe

A szinkrongenerátor állandósult háromfázisú kapocs-rövidzárási állapotában a gép a névleges fordulatszámmal forog, a kapocsfeszültség zérus ($U_g=0$), az

állórésztekercsekben I_g rövidzárási áram folyik, amelynek nagysága a forgórész I_f gerjesztőárama szerint változik. Az I_f áramot változtatva, méréssel meghatározható a szinkrongép $I_g(I_f)$ rövidzárási jelleggörbéje (4.1-3a ábra). A rövidzárási állapotnak megfelelő áramkörüi modellt a 4.1-3b ábra, az U - I fázorábrát a 4.1-3c ábra adja meg. Az állórészáram az áramgenerátoros modell alapján áramosztással fejezhető ki:

$$I_g = A I_f X_{ad} / (X_{ad} + X_s) \quad (4.1-4)$$

Az I_g az I_f növelésekor gyakorlatilag arányosan növekszik (a jelleggörbe egyenes), a névleges I_{gn} fázisáramhoz az I_{fz} rövidzárási forgórészgerjesztés szükséges. Az állórészben indukált U_l feszültséget (amely az állórészáramot kényszeríti) a forgórész- és állórészáram közös forgó mezője hozza létre. Az I_g az állórész ellenállását elhanyagolva 90° -ot fokot késik az indukált feszültséghez képest és jelentősen csökkenti a forgórész gerjesztő hatását (ezt nevezik armatura reakciónak).

Jelöljük az eredő d irányú gerjesztést I_{ad} -vel. Az állórészáram most d irányú, $I_d = I_g$, így $I_{ad} = I_{fd} - I_d = A I_f - I_g$. Az I_{fz} és I_{gn} értékpárhoz az állórészben indukált U_m és az U_g kapocsfeszültség az

$$U_m = X_{ad} I_{adm} = X_{ad} (A I_{fz} - I_{gn}) \quad \text{és} \quad U_g = U_m - X_s I_{gn} = 0$$

egyenletekkel írható le. Ezen $U_m = X_s I_{gn}$ feszültség indukálásához az üresjárási jelleggörbe alapján az $I_{adm} = A I_{fm}$ eredő gerjesztőáram szükséges (az U_m és I_{fm} értéket a 4.1-3a ábra mutatja). Szükséges tehát az $(A I_{fz} - I_{gn}) = A I_{fm}$ egyenértékűsége, vagy másként fogalmazva az I_{gn} állórészáram gerjesztési szempontból $A(I_{fz} - I_{fm})$ értékű forgórészáramot hatástalanít. Ezek alapján a jó közelítéssel állandónak vehető A átszámítási tényező a jelleggörbék és X_s ismeretében meghatározható:

$$A = I_{gn} / (I_{fz} - I_{fm}) \quad \text{ill.} \quad A = (I_{gn} / I_{fz}) (X_{dL} / X_{adL}) \quad (4.1-5)$$

ahol $X_{dL} = U_L / I_g$ az üresjárási jelleggörbe lineáris szakasza szerint.

4.1.1.3 Rövidzárási viszony

A szinkrongenerátorra jellemző villamos paraméter az ún. rövidzárási viszony(szám), amelyet az üresjárási és rövidzárási mérés alapján az

$$RV = I_{fo} / I_{fz} \quad (4.1-6)$$

szerint definiálunk. Az RV nagyobb teljesítményű, hengeres forgórészű generátorokhoz általában 0.5 körüli érték. Ez azt mutatja, hogy az I_{fo} árammal névleges feszültségre gerjesztett, majd háromfázisúan rövidrezárt $RV = 0.5$ paraméterű generátor állandósult kapocszárlati árama a névleges áramnak csak a fele értéke, ha gerjesztést rövidzáráskor továbbra is I_{fo} állandó értéken tartjuk.

Az RV jellemzőt más módon is kifejezhetjük.

Az $U_g = U_{gn}$ üresjárási állapotban az $U_{gn} = X_{adn} A I_{fo}$ alapján

$$I_{fo} = U_{gn} / (A X_{adn})$$

Az $I_g = I_{gn}$ rövidzárási állapothoz $I_{gn} = A I_{fz} X_{ad} / (X_{ad} + X_s)$ írható. Az állórészben indukált U_{sm} a mágnesezési jelleggörbe lineáris szakaszára esik, ezért a főmező reaktancia az $X_{ad} = X_{adL}$ értékkel jellemezhető. Ennek alapján az I_{fz} forgórészáram:

$$I_{fz} = I_{gn} (X_{adL} + X_s) / (A X_{adL})$$

Ezekkel RV -t kifejezve:

$$RV = I_{fo} / I_{fz} = (U_{gn} / I_{gn}) (X_{adL} / X_{adn}) / (X_{adL} + X_s)$$

Az $U_{gn}=1$ ve, $I_{gn} = 1$ ve. választással és a reaktanciákat is viszonylagos egységben véve:

$$RV = (X_{adL} / X_{adn}) / X_{dL}$$

4.1.1.4 A mágneses telítődés leképezése a modellben

Az üresjárási jelleggörbe elemzése kapcsán láttuk, hogy a mágneses telítődés miatt az X_{ad} és így az $X_d = X_{ad} + X_s$ reaktancia nem állandó. Az X_{ad} változása a d irányú eredő mezőáram, vagyis $I_{ad} = I_{fd} - I_d$ függvényében, vagy másként az indukált U_l légrésfeszültség q irányú komponense (vetülete) függvényében, az üresjárási jelleggörbe alapján írható le (ennek részleteit most nem fejtjük ki.)

Az X_s állórész szórási reaktancia függ az I_g állórészáram nagyságától (növekvő I_g esetén az X_s némileg csökken), de változása nem jelentős, ezért jó közelítéssel állandónak vehető.

Abban az esetben, ha az egyszerűbb tárgyalásmód érdekében a telítődést figyelmen kívül hagyjuk akkor az

$$X_{ad} = X_{adn} \quad \text{és} \quad X_d = X_{dn} = X_{adn} + X_s \quad (4.1-7)$$

állandó, ún. telített értékkel jellemezzük a szinkrongenerátort. Evvel nem követünk el mértékadó hibát, mert a légrésfeszültség általában a névleges kapocsfeszültséghez közeli értékű. Ezen közelítéssel a modellben az állandó értékű X_d reaktancia mögötti U_p pólusfeszültség csak a forgórészáramtól függ:

$$U_p = X_{adn} A I_f = X_{adn} I_{fd} \quad (4.1-8)$$

Az egyszerűsített (hosszirányú) áramkörü modellt a fenti értelmezésű U_p és X_d jellemzi..

Üresjárásban a névleges kapocsfeszültségre az $U_{gn} = U_p = X_{adn} A I_{f0}$, rövidzárlásban az I_{f0} -hoz tartozó I_{gzo} állandósult rövidzárlati áramra az $I_{gzo} = U_p / X_{dn} = U_{gn} / X_{dn}$ írható, továbbá a rövidzárlási jelleggörbe jellege miatt fenáll az $I_{gzo} / I_{gn} = I_{f0} / I_{fz}$ arányosság. Ezek alapján (a telítődés elhanyagolásával) az

$$RV \cong 1 / X_{dn} \quad \text{ill.} \quad X_{dn} \cong 1 / RV$$

közelítő összefüggést kapjuk (X_{dn} ve.-ben).

4.1.1.5 Keresztirányú szinkron reaktancia

Az X_d szinkronreaktanciát az állórész felől is megmérhetjük, ha a forgórész-kört nyitjuk ($I_f = 0$), a forgórészt névleges fordulatszámon forgatjuk, az állórészt névleges frekvenciájú U_g szimmetrikus háromfázisú feszültségre kapcsoljuk és a forgórész északi-déli pólusát (d irány) az I_g állórész-áram forgó mezejének irányába hozzuk (4.1-4 ábra). Az állórész ellenállását elhanyagolva a felvett pozitív irányokban az I_g 90° -ot késik U_g -hez képest. Az U_g a q irányba, az I_g a d irányba mutat, vagyis az állórészre az $U_q = U_g$ és $I_d = I_g$ írható. Az áramköri modell alapján:

$$X_d = X_{ad} + X_s = U_g / I_g = U_q / I_d \quad (4.1-9)$$

Az $I_{gf} = I_g / A$ szerint képezve az I_g -vel egyenértékű fiktív forgórész-áramot, az $I_{gf} = I_{fo}$ értékhez az X_{dn} értéket kell kapnunk.

Ha a forgórészt az előbbi helyzethez képest villamos 90° -al előre forgatott helyzetbe hozzuk (4.1-5 ábra), akkor az I_g által létrehozott forgó mező a forgórészt keresztirányban (q irány) szeli át. A felvett pozitív irányokkal az U_g most d irányba, az I_g a q -val ellentétes irányba mutat, vagyis az állórészre az $U_d = U_g$ és $I_q = -I_g$ írható. A d és q irányban azonos X_s reaktanciával az áramköri modell alapján:

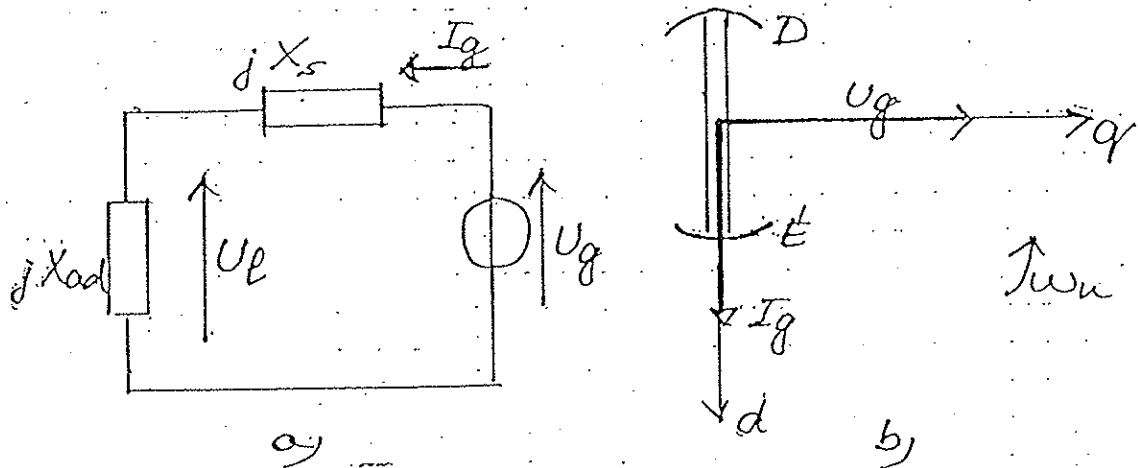
$$X_q = X_{aq} + X_s = U_g / I_g = -U_d / I_q \quad (4.1-10)$$

amelyben X_{aq} a keresztirányú főmező és X_q a keresztirányú szinkron reaktancia. A forgórész vastest kiakasztása miatt (azonos I_g esetén) a mérésből mindig $X_q < X_d$ és így $X_{aq} < X_{ad}$ adódik. A modellben, főként az üzemi áramok tartományában, X_q (és X_{aq}) jó közelítéssel állandónak vehető.

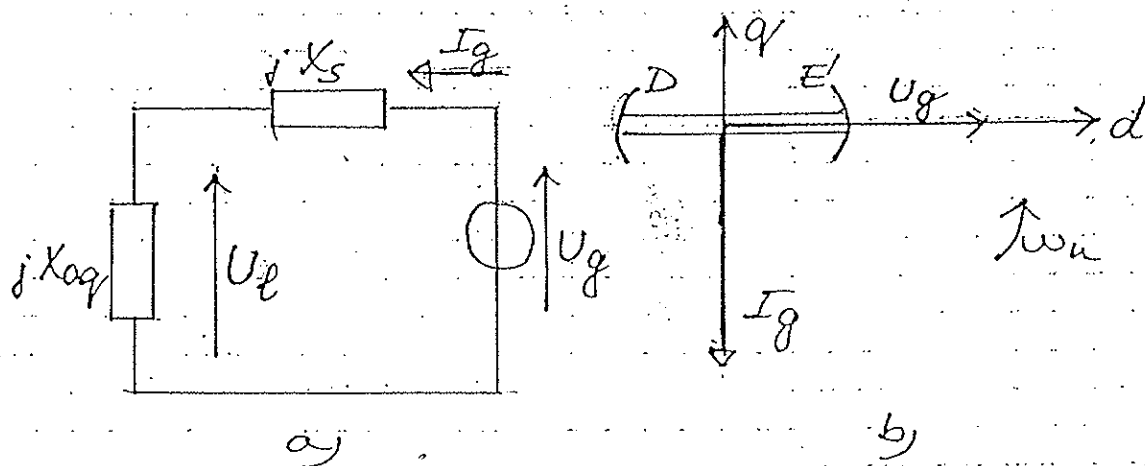
Az előbbieken felvett két kitüntetett irányú forgórész-pozíció a valóságban úgy érhető el, hogy a forgórészt a szükséges szinkron fordulatszámnál valamivel kisebb (vagy nagyobb) fordulattal járattuk, és így az - az I_g által létesített forgó mező irányához

nagyobb) fordulattal járattuk, és így az - az I_g által létesített forgó mező irányához viszonyítva - minden lehetséges irányt felvesz. Azonos U_g -hez az I_g változása követni fogja forgórészhelyzet lassú változását, legkisebb, ill. legnagyobb értékét a forgórész 4.1-4, ill. 4.1-5 ábra szerinti pozíciójában éri el és ez alapján:

$$X_d = U_g / (I_g)_{\min} \quad \text{és} \quad X_q = U_g / (I_g)_{\max}$$



4.1-4 ábra Az X_d mérésének elve az állórész felől
 a) áramköri modell b) fázorábra



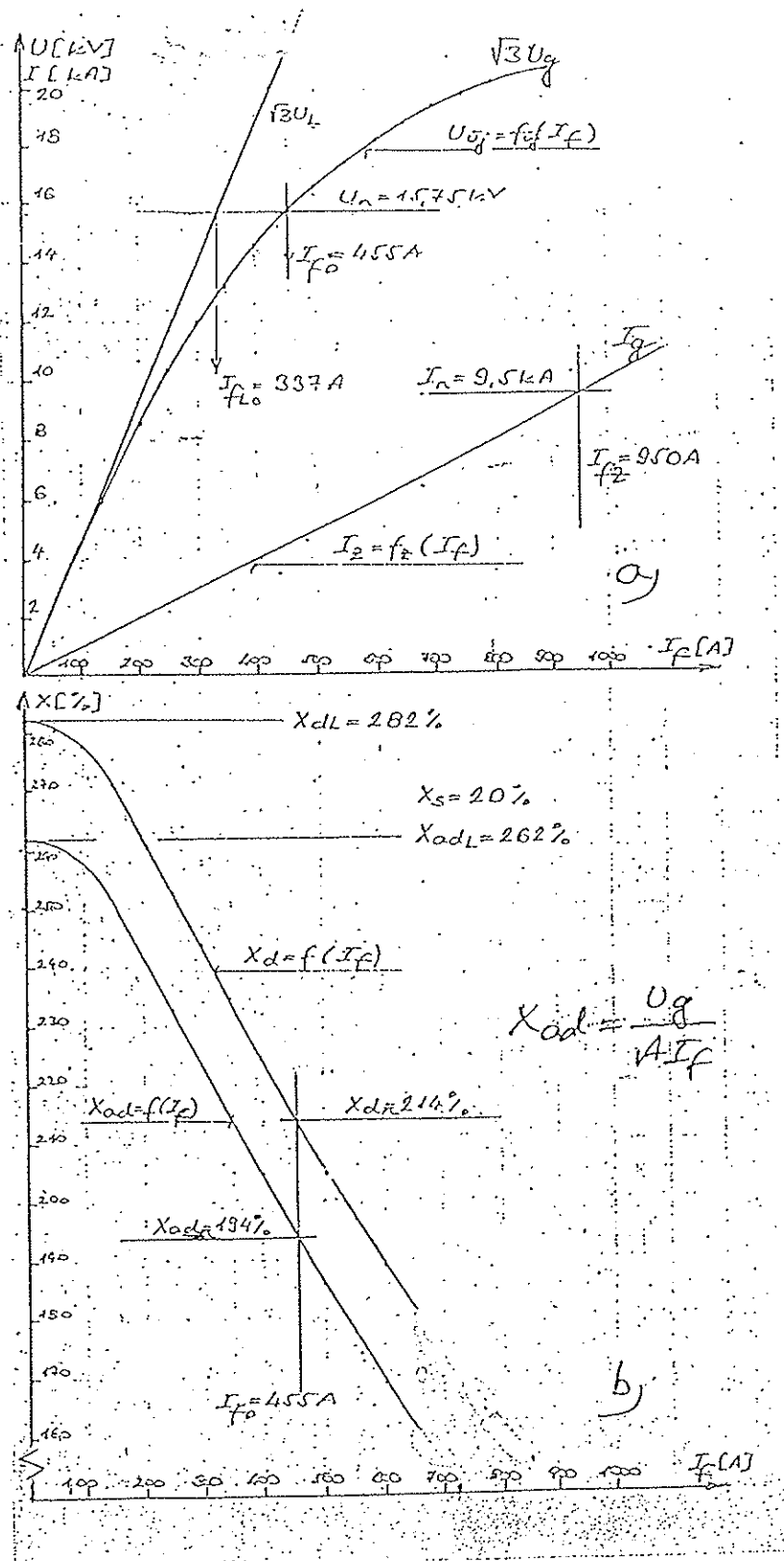
4.1-5 ábra Az X_q mérésének elve az állórész felől
 a) áramköri modell b) fázorábra

4.1.1.6 Generátoradatok állandósult üzemállapothoz

Tájékoztatóként egy Magyarországon elterjedt, ORV 220 típusjelű generátorhoz adunk meg adatokat a 4.1 táblázatban, valamint üresjárási és rövidzárási jelleggörbét, ill. reaktancia-telítődési görbét 4.1-6 ábrán. A reaktanciák az ún. névleges terhelési impedanciára viszonyított értékek ($Z_n=1$ ve., ill. $Z_n = 100\%$) és névleges (50 Hz) frekvenciára vonatkoznak.

n	névleges forgórész-fordulatszám	3000	1/perc
S_n	névleges háromfázisú állórészteljesítmény	259	MVA
U_n	névleges kapocsfeszültség, vonali érték	15.75	kV
I_n	névleges állórészáram, $I_n = S_n / (1.73 U_n)$	9.5	kA
$\cos\varphi_n$	teljesítménytényező a $P_{tn} = 220$ MW turbinateljesítményhez	0.85	
Z_n	névleges terhelési impedancia, $Z_n = U_n / (1.73 I_n)$	0.958	ohm
R_a	állórész ellenállás (egy fázis, 75 °C -on)	0.002	ve.
X_s	állórész szórási reaktancia	0.20	ve.
X_{adL}	hosszirányú főmező reaktancia, telítetlen érték	2.62	ve.
X_{adn}	hosszirányú főmező reaktancia, telített érték	1.94	ve.
X_{dL}	hosszirányú szinkron reaktancia, telítetlen érték	2.82	ve.
X_{dn}	hosszirányú szinkron reaktancia, telített érték	2.14	ve.
X_{aq}	keresztirányú főmező reaktancia (telített érték)	1.50	ve.
X_q	keresztirányú szinkron reaktancia (telített érték)	1.70	ve.
U_{fo}	üresjárási forgórészfeszültség névleges kapocsfeszültséghez	136	V
I_{fo}	üresjárási forgórészáram névleges kapocsfeszültséghez	455	A
I_{fz}	rövidzárási forgórészáram névleges állórészáramhoz	950	A
RV	rövidzárási viszony, $RV = I_{fo} / I_{fz}$	0.479	
A	forgórészáram állórészre-átszámítás tényezője	10.76	A_{eff}/A_{dc}

4.1 táblázat Paraméterek egy ORV 220 típusú szinkrongenerátor állandósult üzeméhez



4.1-6 ábra Az ORV 220 típusjelű, 259 MVA-s szinkrongenerátor jellemzői

a) üresjárási és rövidzárási jelleggörbe

b) X_{ad} , ill. X_d telítődési görbe