

F. NOVOD

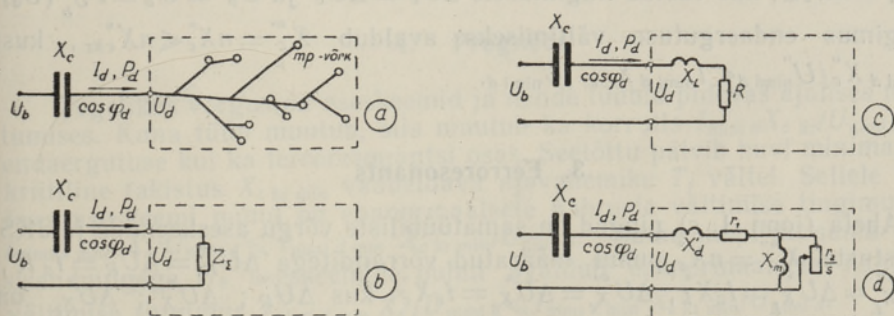
## JÄRJESTIKKOMPENSATSIOONISEADMETE RAKENDAMISEL ESINEVATE EBANORMAALSETE VOOLU JA PINGE TÕUSUDE NING KÕIKUMISTE PROGNOOSIST

Järjestikkompensatsiooniseadmete (JKS) kasutamisel keskpingevõrkudes esineb ebanormaalset voolu ja pingetõuse ning kõikumisi. Kuigi neid nähtusi on käsitletud [1–5], puudub teada olevail andmeil seni nende prognoosimise meetodika. See on tingitud senisel lähenemisel esinevatest matemaatilistest raskustest ning vajalike lähteandmete suurest hulgast. Käesolevas artiklis esitatakse senisest erineval lähenemisel väljatöötatud lihtne ja universaalne meetodika ja selle rakendamine Eesti NSV põllumajanduslikes elektrivõrkudes olemasolevates JKS-des esinevate ebanormaalsete nähtuste baasil.

Katseseadmeil ja mudeliteil teostatud uurimised näitasid, et need ebanormaalset nähtused kujutavad endast ferroresonantsi ja asünkroonmootorite endaergutust. Nende nähtuste tekkimise prognoosimine lahendatakse neljas etapis: 1) võrgu aseskeem, 2) endaergutus, 3) ferroresonants ja 4) prognoos.

### 1. Võrgu aseskeem

Üle JKS toidetavat võrku (joon. 1, a) kujutatakse pidevalt muutuva fiktiivse tarbijana (joon. 1, b), mida vastavalt käsitletavale probleemile asendavad mingil hetkel aseskeemid (joon. 1, b, c, d). Aseskeemi iga takistuse üldiseks tähistuseks on  $Z_i$ . Aseskeemi d puhul on võrku kujutatud fik-



Joon. 1. Aseskeemid.

tiivse asünkroonmootorina, kusjuures  $r_1$  on staatori aktiivtakistus koos lisanduvate takistustega;  $r_2$  — staatorile redutseeritud rootori aktiivtakis-

tus;  $X'_d$  — puistetakistus toitevõrgu sagedusel;  $X_m$  — magneetimistakistus toitevõrgu sagedusel;  $X_m + X'_d = X_d$ ;  $[r_1/(r_1 + r_2)]^2 = k$ ;  $[(r_1 + r_2)/X_m] \times \times (X_d - kX'_d) = a$ ;  $n_2/n_0 = \Omega$ ;  $n_2$  — rootori pöörete arv;  $n_0$  — rootori sünkroonpöörete arv;  $s$  — libistus.

Pinged väljendatakse kilovoltides ja suhtelistes ühikutes:  $U_i^* = U_i/U_{\text{nimi } d}$  ( $U_{\text{nimi } d}$  — nimipinge JKS asukohas); voolud — amprites ja suhtelistes ühikutes:  $I_d^* = I_d/I_{\text{nimi } d}$  ( $I_{\text{nimi } d}$  — nimipingele  $U_{\text{nimi } d}$  vastav vool  $I_d$ ); võimsused — kilovattides; takistused — oomides, leppelistes ühikutes:  $Z_i^* = (\sqrt{3} \cdot 10^{-3}/U_{\text{nimi } d}) Z_i A^{-1}$  ja suhtelistes ühikutes:  $Z_i^{**} = Z_i/Z_{\text{nimi } i}$  ( $Z_{\text{nimi } i}$  — nimipingele  $U_{\text{nimi } d}$  vastav takistus).

Aseskeemi tüübile loetakse iseloomulikuks seosed  $Z_i^{**} = F_{Z_i^{**}}(U_d^*)$  ja  $\Omega = F_{\Omega}(U_d^*)$ . Nendega on määratud seosed  $I_d^* = F_{I_d^*}(U_d^*)$ ;  $\varphi_d = F_{\varphi_d}(U_d^*)$  ja antud konkreetsele aseskeemile vastav  $P_d = F_{P_d}(U_d)$ . Tähistades sama tüüpi aseskeemide kohta käivad suurused täiendava märgiga ( $''$ ), avalduvad üldkujul ( $U_d'' = U_d^*$ ) nende takistused  $Z_i^{**} = nZ_i^*$  ja  $Z_{\text{nimi } i}^{**} = nZ_{\text{nimi } i}^*$ ; voolud  $I_d'' = I_d/n$ ; pinged  $U_d'' = mU_d$  ja  $U_{\text{nimi } d}'' = mU_{\text{nimi } d}$ ; võimsused  $P_d'' = P_d/mn$ . Seejuures  $n = Z_{\text{nimi } i}^{**}/Z_{\text{nimi } i}^* = I_{\text{nimi } d}^*/I_{\text{nimi } d}''$  ja  $m = U_{\text{nimi } d}''/U_{\text{nimi } d}$ .

JKS sisendpinge  $U_b^*$  (joon. 1) on avaldatav võrrandist  $U_d^* = U_b^* + \Delta U_c^*$ , kusjuures pingemuutus JKS-l  $\Delta U_c^*$  avaldub  $\Delta U_c^* = F_{\Delta U_c^*}(U_d^*; \Delta U_{X_c}^*)$ , kus  $\Delta U_{X_c}^* = I_d X_c^*$ . Seega sama aseskeemi tüübi puhul on pingemuutused võrdsed ( $\Delta U_c^{**} = \Delta U_c^*$ ), kui  $X_c^{**} = nX_c^*$ . Sel juhul  $U_b^{**} = U_b^* = F_{U_b^*}(U_d^*)$ .

## 2. Endaergutus

Kriitiline takistus endaergutuse tekkimisele  $X_{c \text{ kr}}$  (toitevõrgu sagedusel) on avaldatav võrrandist [2] (vt. aseskeem joon. 1, d):

$$(X_{c \text{ kr}} - \Omega^2 X_d + a)(X_{c \text{ kr}} - \Omega^2 k X'_d - ka) + ka^2 = 0.$$

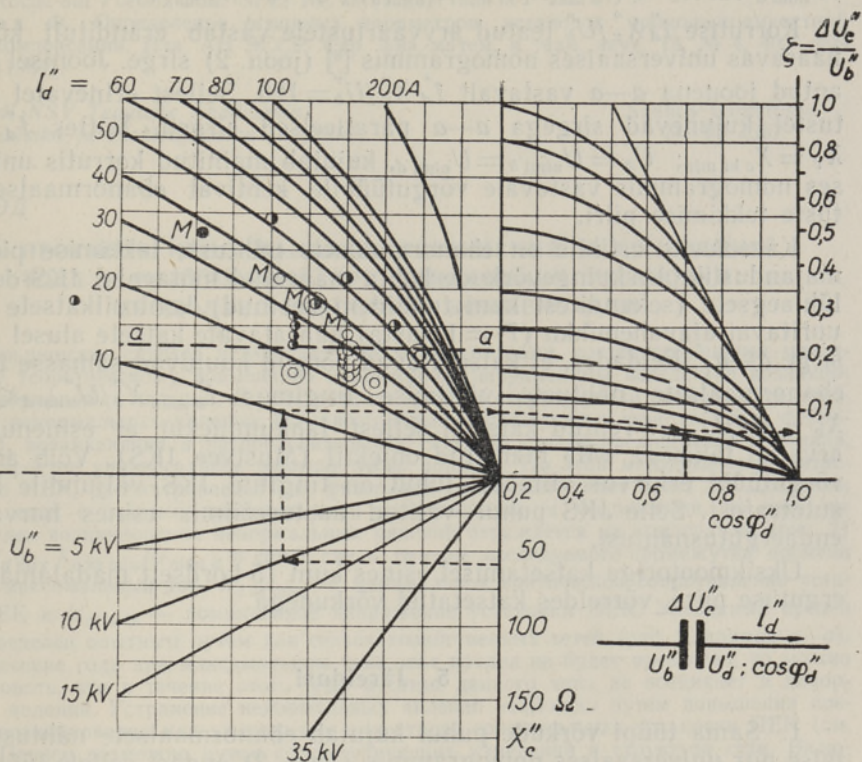
Siit avaldub samatüübiliste aseskeemide puhul kriitiline takistus üldkujul  $X_{c \text{ kr}}^{**} = nX_{c \text{ kr}}^*$ , mis vastab tingimusele  $\Delta U_c^{**} = \Delta U_c^*$  ja  $U_b^{**} = U_b^* = F_{U_b^*}(U_d^*)$ . Tingimus endaergutuse vältimiseks avaldub  $X_c^{**} = nX_c^* \leq nX_{c \text{ kr}}^*$ , kust  $I_{\text{nimi } d}'' X_c''/U_{\text{nimi } d}'' \leq I_{\text{nimi } d} X_{c \text{ kr}}/U_{\text{nimi } d}$ .

## 3. Ferroresonants

Ahela (joon. 1, c) pinged on samatüübiliste võrgu aseskeemide ja JKS takistuste  $X_c^{**} = nX_c^*$  puhul määratud võrranditega  $\Delta U_{R_i}^{**} = \Delta U_{R_i}^* = I_d R_i^*$ ,  $\Delta U_{X_L}^{**} = \Delta U_{X_L}^* = I_d X_L^*$ ,  $\Delta U_{X_c}^{**} = \Delta U_{X_c}^* = I_d X_c^*$ , kus  $\Delta U_{R_i}^*$ ;  $\Delta U_{X_L}^*$ ;  $\Delta U_{X_c}^*$  on pingelangud takistustel  $R_i$ ;  $X_L$  ja  $X_c$ .

Seega avaldub kriitiline takistus ferroresonantsi tekkimisele  $X_{c \text{ kr}}^{**} = nX_{c \text{ kr}}^*$  ja analoogiliselt endaergutusele avaldub ferroresonantsi vältimise tingimus  $I_{\text{nimi } d}'' X_c''/U_{\text{nimi } d}'' \leq I_{\text{nimi } d} X_{c \text{ kr}}/U_{\text{nimi } d}$ .

$$\xi = \Delta U_c'' / U_b'' = \sqrt{3} \cdot (I_d'' X_c'' / U_b'') \cdot \sin \varphi_d'' \cdot 10^{-3} - 1,0 + \sqrt{1,0 - 3 \cdot (I_d'' X_c'' / U_b'')^2 \cos^2 \varphi_d''} \cdot 10^{-6}$$



KATSETE TULEMUSED	KATSE KESTUS	
Ebanormaalseid nähtusi	Lühiaegne	$T_j = 1$ aasta
esines	●	⊙
ei esinenud	○	⊖
osal katseist esines, osal mitte	◐	

Joon. 2. Universaalne nomogramm JKS parameetrite määramiseks.

#### 4. Prognoos

Tegelikus võrgus on aseseemid ja nende tüübid pidevas ajalises muutumises. Kuna tüüp muutub, siis muutub ka korrutis  $I_{nimi d} X_{c kr} / U_{nimi d}$  nii endaergutuse kui ka ferroresonantsi osas. Seetõttu pälvib huvi minimaalne kriitiline takistus  $X_{c kr min}$  vaadeldava ajavahemiku  $T_j$  vältel. Sellele vastava aseseemi puhul on ebanormaalsete nähtuste vältimise tingimuseks  $I_{nimi d min} X_c / U_{nimi d} \leq I_{nimi d min} X_{c kr min} / U_{nimi d}$ . Sama tüüpi ja sama JKS sisendpingega  $U_b^*$  aseseemide puhul avaldub ebanormaalsete nähtuste vältimise tingimus  $I_{nimi d min} X_c'' / U_{nimi d} \leq I_{nimi d min} X_{c kr min} / U_{nimi d}$ .

Võrgu tüübile loetakse iseloomulikuks vaadeldava ajavahemiku  $T_j$  vältel aseseemide tüüpide ajaline sõltuvus, suhe  $I_{nimi d}(t) / I_{d max} = k(t)$  ( $I_{d max}$  — maksimaalne vool ajavahemiku  $T_j$  vältel) ja JKS sisendpinge ajaline kulgemine  $U_b^*(t)$ . Seega sama tüüpi võrkude puhul avaldub eba-

normaalsete nähtuste vältimise tingimus  $I_{d \max}'' X_c'' / U_{\text{nimi } d}'' \leq I_{d \max} X_{c \text{ kr min}} / U_{\text{nimi } d} \text{ või } X_c''' \leq (I_{d \max} X_{c \text{ kr min}} / U_{\text{nimi } d}) \sqrt{3} \cdot 10^{-3} / I_{d \max}''$ .

Korrutise  $I_d'' X_c'' / U_b''$  teatud arvväertustele vastab eranditult kõiki JKS haaravas universaalses nomogrammis [6] (joon. 2) sirge. Joonisel 2 on see antud joonena  $a-a$  vastavalt  $I_d'' X_c'' / U_b'' = 120$ . Sellest erinevatel arvväertustel kujunevad sirgega  $a-a$  paralleelsed sirged. Võttes  $I_d'' = I_{d \max}''$ ;  $X_c'' = X_{c \text{ kr min}}''$ ;  $U_b'' = U_{\text{nimi } b}'' = U_{\text{nimi } d}''$ , kujutab mainitud korrutis universaalses nomogrammis vastavale võrgutüübile kehtivat ebanormaalsete nähtuste tekkimise piiri.

Käesolevas artiklis on ebanormaalsete nähtuste tekkimise piir põllumajanduslike keskpingevõrkude kohta määratud töötavatel JKS-del tehtud lühiaegsete (sekunditest kuni tundideni kestnud) kontrollkatsete ja kogu uuritavat ajavahemikku ( $T_j = 1$  aasta) haaratavate katsete alusel (joon. 2, sirge  $a-a$ ). Eeldades, et katsetatavad võrgud kuuluvad samasse tüüpi, on ebanormaalsete nähtuste vältimise tingimus  $I_{d \max}'' X_c'' / U_{\text{nimi } d}'' \leq 120$  või  $X_c''' \leq 0,2 / I_{d \max}''$ . Tehtud katsetel sellest lahkuminekut ei esinenud, välja arvatud tähisega «M» märgitud objektile (Mustvee JKS). Võib arvata, et võrgutüübi erinevus viimasel juhul on tingitud JKS väljundile lülitatud autotrafost. Selle JKS puhul valitud aastarežiimis esines harva nõrku endaergutusnähtusi.

Üksikmootoriga katsetamisel esines kuni 15-kordselt madalamaid endaergutuse piire, võrreldes katsetatud võrkudega.

## 5. Järeldusi

1. Sama tüüpi võrkude puhul kujutab ebanormaalsete nähtuste tekkimise piir universaalses nomogrammis (joon. 2) endast sellele tüübile vastavat sirget  $I_{d \max} X_{c \text{ kr min}} / U_{\text{nimi } d} = \text{const}$ . Valides JKS mahtuvusliku takistuse selliselt, et vaadeldava ajavahemiku maksimaalvoolu juures ei ületataks seda sirget, tagatakse ebanormaalsete nähtuste vältimine kogu ajavahemikul.

2. Vastavalt põllumajanduslikes keskpingevõrkudes tehtud katsetele oli ebanormaalsete nähtuste tekkimise piir aasta kohta 120 (joon. 2, sirge  $a-a$ ).

3. Ebanormaalsed nähtused on kõrvaldatavad nende tekkimise piiri tõstmise või JKS mahtuvusliku takistuse vähendamise (vt. joon. 2) teel. Neist esimene on võimalik üle JKS toidetava võrgu aseseemi struktuuri sobiva muutmise abil. JKS kondensaatorpatareile paralleelse oomilise takistuse lülitamine kujutab endast kunstlikku aseseemi struktuuri ja JKS mahtuvusliku takistuse muutmist [5]. See moodus ei osutunud tehtud katsetel otstarbekaks.

## KIRJANDUS

1. Butler I. W., Concordia C., Analysis of Series Capacitor Application Problems. Electr. Engng, No. 56 (1937).
2. Satche M., L'autoeccitation par condensateurs des machines asynchrones. Bull. SFE, No. 1 (1951).
3. Ибрагимов И. Э., Самовозбуждение асинхронных двигателей при продольной емкостной компенсации потери напряжения, Труды ЭНИН АН АзССР, XI (1955).
4. Воронов Л. И., Аналитический метод исследования режима напряжения в сети 6—10 кв с продольной емкостной компенсацией. Научн. труды (Сев.-Зап. н.-и. ин-т с.-х.), вып. 3, ч. III, 1959.

5. Chappée M. F., Les problèmes d'alimentation et de distribution particuliers à la traction électrique à 50 p.s. Installations fixes de la ligne d'Aix-les-Bains à la Roche-sur-Foron. Bull. SFE, No. 9 (1951).
6. Новод Ф., Определение основных параметров установок продольно-емкостной компенсации. Изв. АН ЭССР. Сер. физ.-матем. и техн. наук, 13, № 4, 403—409 (1964).

Eesti NSV Teaduste Akadeemia  
Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituut

Saabus toimetusse  
21. VI 1967

Ф. НОВОД

### О ПРОГНОЗЕ НЕНОРМАЛЬНЫХ ПОВЫШЕНИЙ И КОЛЕБАНИЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УСТАНОВКИ ПРОДОЛЬНО-ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В большинстве случаев установки ПЕК с параметрами, соответствующими максимальному теоретическому повышению напряжения, неприменимы вследствие возникновения ненормальных явлений. До настоящего времени отсутствовали возможности предсказания ненормальных явлений (самовозбуждение асинхронных двигателей и феррорезонанс), возникающих в распределительных сетях. В статье предлагается методика, дающая простое универсальное решение этого вопроса. По этой методике сеть, питаемая через ПЕК, рассматривается как фиктивная схема замещения (рис. 1). Доказано, что при сетях с разными номинальными напряжениями и мощностями, но того же типа, предел возникновения ненормальных явлений отражается на номограмме (рис. 2) прямой  $I_{d \max} X_{c \text{ kr min}} / U_{\text{ннмид}} = \text{const}$ , где в течение исследуемого промежутка времени  $I_{d \max}$  — максимальный ток,  $X_{c \text{ kr min}}$  — минимальное критическое сопротивление установки ПЕК и  $U_{\text{ннмид}}$  — номинальное напряжение установки ПЕК. Указанный предел (120) определен опытным путем для сельскохозяйственных сетей (рис. 2, прямая  $a-a$ ). Если в течение года при максимальном токе этот предел не будет превышен, то можно гарантировать, что в течение этого года в сетях данного типа не возникнет и ненормальных явлений. Устранение ненормальных явлений возможно путем повышения предела их возникновения или уменьшения емкостного сопротивления установки ПЕК (см. рис. 2). Первое возможно путем соответствующих изменений в структуре сети. Включение омического сопротивления параллельно с конденсаторной батареей установки ПЕК соответствует искусственному изменению структуры сети и изменению сопротивления установки ПЕК. Как показали проведенные нами опыты, последний способ оказался нецелесообразным.

F. NOVOD

### ÜBER DIE VORAUSSAGE VON STÖRENDEN STEIGERUNGS- UND SCHWANKUNGERSCHEINUNGEN DER SPANNUNG UND DES STROMES BEI VERWENDUNG VON REIHENKONDENSATOREN ZUR SPANNUNGSSTÜTZUNG IN MITTELSPANNUNGSNETZEN

Bis zur letzten Zeit bestand keine Möglichkeit zur Voraussage von Störungen (Selbsterregung der Asynchronmotoren und Ferreresonanz) bei Verwendung von Reihen-kondensatoren zur Spannungsstützung in Mittelspannungsnetzen. Im Aufsatz wird zur Voraussage dieser Störungen eine Methode entwickelt. Es wird bestätigt, daß bei Netzen mit verschiedenen Nennspannungen und Nennleistungen, aber gleichen Typs, die Grenze des Auftretens von Störungen im Nomogramm (Fig. 2) eine Gerade ( $I_{d \max} X_{c \text{ kr min}} / U_{\text{ннмид}} = \text{const}$ ) bildet (während der zu untersuchenden Zeitspanne:  $I_{d \max}$  — maximaler Strom,  $X_{c \text{ kr min}}$  — minimaler kritischer Widerstand der Kompensationsanlage, und  $U_{\text{ннмид}}$  — Nennspannung der Kompensationsanlage). Für landwirtschaftliche Netze gleichen Typs ist auf experimentellem Wege diese Grenze (120) ermittelt (Fig. 2, Gerade  $a-a$ ). Wenn beim Jahresmaximalstrom diese Grenze nicht überschritten wird, ist während des ganzen Jahres störungsfreier Betrieb gesichert.

Die Beseitigung der Störungen ist möglich durch Hebung der Störungsgrenze oder durch Verminderung des Widerstandes der Kondensatorenanlage. Die Hebung der Grenze ist möglich durch eine entsprechende Veränderung der Netzstruktur. Die Parallelschaltung eines Wirkwiderstandes für die Kondensatorbatterie entspricht der Veränderung der Netzstruktur und der gleichzeitigen Verminderung des Widerstandes der Kondensatoren. Diese Methode erwies sich während der durchgeführten Versuche als unbrauchbar.