

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 23 (1932)
Heft: 15

Artikel: Statische und dynamische Stabilität von elektrischen Kuppelleitungen zwischen Netzen und zwischen Kraftwerken
Autor: Schönholzer, Ernst
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059333>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Statische und dynamische Stabilität von elektrischen Kuppelleitungen zwischen Netzen und zwischen Kraftwerken.

Von Ernst Schönholzer, Ingenieur, Zürich.

621.3.016.32:621.311.16

Einleitend wird auf die grosse Bedeutung der statischen und dynamischen Stabilität beim Verbundbetrieb von Kraftwerken hingewiesen; dann wird, vom einfachsten zum komplizierteren Fall fortschreitend untersucht, wie die Anfangs- und Endspannung und die vier Leitungskonstanten die Höhe der auf Kuppelleitungen stabil übertragbaren Leistung beeinflussen. Praktische Zahlenbeispiele und Vektordiagramme erläutern die Theorie. Der Aufsatz erhebt nicht den Anspruch, lückenlos zu sein. Insbesondere musste das wichtige Kapitel über dynamische Stabilität räumlich halber eine Beschränkung erfahren. Uebrigens ist das Studium dieses Gebietes noch sehr im Fluss und das Wissen darüber noch grosser Vertiefung fähig. Schliesslich sei bemerkt, dass absichtlich nur das Zweimaschinenproblem behandelt wurde, um den Aufsatz nicht allzulang werden zu lassen.

Inhaltsübersicht.

- A. Einleitung.
- B. Benennung elektrischer Grössen.
- C. «Elektrotechnisches Aehsenkreuz» zur Darstellung von Wirk- und Blindleistung, sowie von Wirk- und Blindlast.
- D. Stabilitätsbetrachtung an der verlustlosen ungesättigten Vollpolsynchronmaschine.
- E. Schematische und diagrammatische Darstellung der Generator- und Motorpolradstellungen und Spannungen (Stabilitätswinkel) bei verschiedenen Belastungen nebst den dabei auftretenden synchronisierenden Leistungen.
- F. Mechanisches Analogiemodell (einfachster Art) zum Studium der Stabilität von elektrischen Kuppelleitungen.
- G. Berechnung der kritisch stabilen Grenzleistung oder statischen Kippleistung, welche auf einer einfachen Drehstrom-Kuppelleitung übertragen werden kann.
- H. Mittel zur Erhöhung der statisch und dynamisch stabil übertragbaren Wirkleistung.
- J. Dynamische Stabilität und Stoss-Stabilität. Statische und dynamische Grenzleistung.
- K. Einfluss von Schaltvorgängen.
- L. Literaturverzeichnis.

A. Einleitung.

Je mehr sich in der Elektrowirtschaft die Erkenntnis durchsetzt, dass der *Verbundbetrieb* von Kraftwerken und Netzen gegenüber dem Einzelbetrieb bedeutende technische und wirtschaftliche Vorteile besitzt, tritt auch das Problem der *statischen und dynamischen Stabilität* elektrisch gekoppelter Netze und Kraftwerke in den Vordergrund, besonders dann, wenn die Verbundwirtschaft, die nationalen Grenzen überschreitend, sich zur internationalen Gemeinschaftsarbeit fortentwickelt. Während früher bei den kleinen übertragenen Leistungen die Frage der Stabilität bei der Projektierung von elektrischen Fernleitungen kaum Aufmerksamkeit verdiente, ist ihr heute bei den grossen Leistungen und Distanzen grösste Sorgfalt zuzuwenden.

In Fig. 1 ist ein solcher Verbundbetrieb für eine verlustlose Uebertragung generell und ersatz-schematisch dargestellt. Es ist für das Studium der Stabilitäterscheinungen anfänglich leichter, wenn auch nicht direkt notwendig, sich das eine Kraftwerk als «generatorische», das andere als «motorische» Anlage vorzustellen. In der vorliegenden Arbeit ist in späteren Figuren von dieser grösseren Anschaulichkeit mehrmals Gebrauch gemacht wor-

Au début, l'auteur appuie sur l'importance de la stabilité statique et dynamique de centrales accouplées; il étudie ensuite, en partant du cas le plus simple, l'influence des tensions initiales et finales ainsi que des quatre constantes de ligne sur la valeur de la puissance transmissible en régime stable par des lignes de couplage. La théorie est complétée par des exemples numériques et par des diagrammes vectoriels. L'article n'a pas la prétention d'être sans lacunes. En particulier, le chapitre important sur la stabilité dynamique a dû être écourté pour manque de place. D'ailleurs ces problèmes sont encore à l'étude, et ce qu'on en sait est susceptible d'être encore bien approfondi. Finalement soit dit qu'à dessein seul le problème de deux machines a été traité, afin que l'article ne devienne pas trop long.

den, indem das Kraftwerk links als Generator, dasjenige rechts als Motor bezeichnet worden ist, um das physikalische Verständnis der Bedeutung der Polradstellungen beider Maschinen zu erleichtern.

Fig. 1 illustriert ein rein induktives System vom Nullpunkt A des Generators G_1 bis zum Nullpunkt F des «Motors» oder Generators G_2 , schliesst also

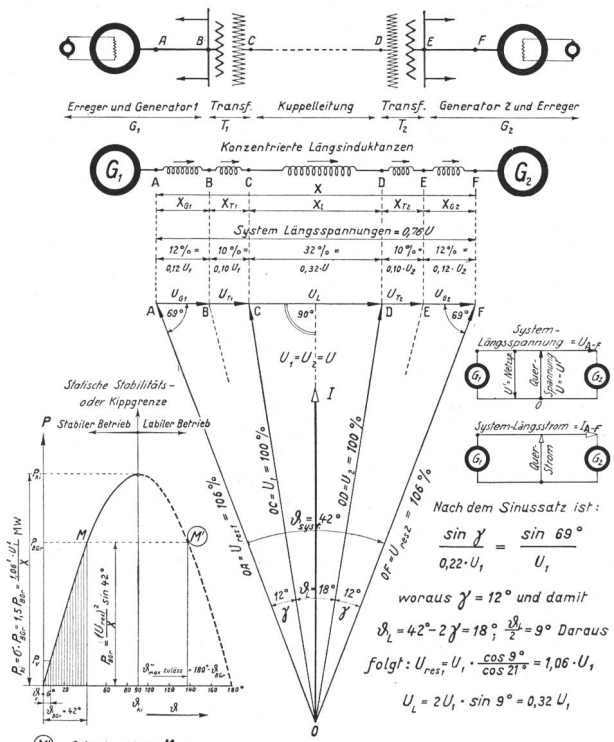


Fig. 1.

Schema und Diagramm für ein rein induktives und querstromloses, also verlustloses Energie-Ueberlastungs-System, für noch 50 % statisch steigerbare Last.

(Es ist $\sin 42^\circ = \frac{100}{100 + 50} = 0,67$.)

alle Längs-Induktanzen der Uebertragung in sich ein. Je nachdem, welche Spannungen am Anfang und Ende derselben konstant gehalten werden können (ob Oberspannung, ob Unterspannung an den Maschinenklemmen, oder die resultierende Spannung des Luftspaltfeldes), müssen die dazwischen

vorhandenen «Längs- und Querimpedanzen», in unserem einfachen Fall der Fig. 1 nur die Längsinduktanzen des betrachteten Systemteiles in die Rechnung einbezogen werden. Also z. B. bei Netzen mit konstanter Oberspannung am Anfang und Ende ist nur die Leitungsinduktanz X_1 von C bis D, bei Netzen mit konstanter Unterspannung nur die Induktanz ($X_{T_1} + X_L + X_{T_2}$) vom Systempunkt B bis E zu berücksichtigen.

Ist bei einer Uebertragung die zu transportierende Leistung von der gleichen Grössenordnung wie die Gesamtleistung des speisenden und von der Kuppelleitung gespeisenden Netzes, so wird es vorichtig sein, die gesamte Längsimpedanz Z_{A-F} in die Rechnung einzusetzen, um nicht bei allfälligen starken Belastungsstössen den Zusammenbruch des synchronen Betriebes zu riskieren. Dabei ist auch die Erregungs- und Reglerfrage sehr wichtig.

Im Vektordiagramm Fig. 1 sind links unten Vektorverhältnisse und Grösse der Stabilitätswinkel für einen um 50 % überlastbaren Betrieb angegeben. Rechts in Fig. 1 zeigen zwei kleine Schemata, was unter Längs- und Querspannung, sowie Längs- und Querstrom des Uebertragungssystemes zu verstehen ist.

Allgemein bekannt ist aus der Theorie der Synchronmaschinen, dass ein Synchronmotor, dem man ein Lastmoment zumutet, das grösser ist als sein Kippmoment, «aus dem Tritt fällt» und stille steht. Ähnlich ergeht es dem Synchrongenerator, dem man von der Antriebsmaschine her ein Drehmoment aufdrücken wollte, das grösser ist als sein Kippmoment. Er ist nicht mehr in der Lage, ein entsprechendes Gegenmoment zu entwickeln und «geht deshalb durch». Die elastische Verbindung zwischen Netz und Polrad der Maschine darf man also nicht überbeanspruchen, wenn ein synchrones Zusammenarbeiten beider aufrechterhalten werden soll.

Weniger bekannt ist, dass auch über eine Kuppelleitung, welche zwei Netze oder zwei Kraftwerke miteinander verbindet, nur eine ganz bestimmte kritische Grenzleistung oder Kippleistung stabil übertragen werden kann, ohne dass eine solche Ueberbeanspruchung der elektrischen Verbindung zwischen Generator und Motor auftritt.

Stabil nennen wir allgemein ein System Fig. 1, bestehend aus Kraftwerk I, Auftransformator-Kuppelleitung-Abtransformator-Kraftwerk II, das für den betrachteten Belastungszustand oder nach vorangegangenen Belastungsänderungen im synchronen Betriebe bleibt.

Im besonderen nennen wir ein System *statisch stabil*, so lange mit einer Zunahme des Stabilitätswinkels $\Delta\vartheta$ nur eine Zunahme ΔP der übertragenen Wirkleistung einhergeht¹⁾. Unter Stabilitätswinkel ϑ ist die Phasenverschiebung der Spannungsvektoren der zu kuppelnden Netze bzw. Kraftwerke

¹⁾ Selbstverständlich treten theoretisch schon bei den geringsten und langsamsten Belastungsänderungen sehr kleine Winkelschwingungen auf, die aber ganz ungefährlich sind, weil sie wieder rasch abklingen. Wir denken hier also nur an die Mittelwerte von ΔP und $\Delta\vartheta$.

verstanden. Diese Spannungen sind dabei stets als konstant vorausgesetzt. An der Grenze, wo bei wachsendem Stabilitätswinkel die Leistungszunahme Null wird, wo der stabile in den gefährlichen labilen Betrieb übergeht, ist das System an seiner kritischen oder «Kippgrenze» angelangt. An der Kippgrenze oder statischen Stabilitätsgrenze ist der Kippwinkel ϑ_{ki} erreicht.

Dynamisch stabil hingegen nennen wir ein System, in dem nach vorausgegangenen Belastungsstössen keine grösseren Winkelschwingungen $\vartheta \sim$ der Konstantspannungsvektoren auftreten, als sich aus der Differenz von 180° minus dem Vorbelastungswinkel ϑ , ergibt, d. h. die Abszisse des Spiegelpunktes M' der Leistungskurve in Fig. 1 also nicht überschritten wird. Die 180° gelten aber nur für die verlustlose Uebertragung; bei der wirklichen ist $\vartheta_{\max} \sim = 2\vartheta_{ki} - \vartheta$.

Werden diese Stabilitätsbedingungen nicht erfüllt, dem System also Uebertragungsleistungen und Stösse zugemutet, für die es nicht gebaut ist, so verschwindet die an die relative Polradlage gebundene Synchronkraft voll und ganz. Das System gerät in den labilen Bereich (Fig. 1), wo sogar eine *desynchronisierende Leistung* P_s wirkt, welche die Polräder mehr und mehr auseinander reisst, bis ihre $E M K_{res}$ schliesslich in direkter Opposition stehen. Die unerfreulichen Folgen des Zusammenbruches der synchronen Parallelarbeit sind allen erfahrenen Betriebsleuten hinlänglich bekannt. Nicht umsonst werden in Stromlieferungsverträgen zwischen verwaltungsfremden Elektrizitätsgesellschaften den Kontrahenten scharfe Strafbestimmungen auferlegt, die auf einen ununterbrochenen Synchronbetrieb hinwirken sollen.

Das Problem der Stabilität ist also von grösstem aktuellem Interesse, dem sich keine verantwortliche Instanz eines Unternehmens verschliessen darf, der die Projektierung von grossen Netz- und Kraftwerkskuppelleitungen anvertraut ist.

B. Die Benennung elektrischer Grössen.

Es wird sich bei unseren Untersuchungen als nützlich erweisen, präzise und doch einfache Ausdrücke und Namen für dieselben zur Verfügung zu haben. Siehe Fig. 1.

1. *Die System-Querspannung* U_{0A} bis U_{0F} . Sie ist gleich der Phasenspannung vom Nullpunkt O des Systems bis zum betrachteten Systempunkt, z. B. A (im Ersatzschema und Diagramm der Fig. 1), B, C, D, E oder F multipliziert mit $\sqrt{3}$. Sie ist gleich gross, wie die in der Literatur als «aufgedrückte» bekannte Spannung U' , ihr aber entgegengesetzt gerichtet, also Querspannung $U =$ Negative Netzspannung (oder «aufgedrückte» Spannung) $= -U'$.

2. *Die System-Längsspannung* U_{A-F} , dargestellt durch den Vektor AF , berechnet aus dem Leitungsstrom I mal $\sqrt{3}$ mal der gesamten sogenannten Längsimpedanz $Z = R + j \cdot X$. Die Ohmsche Komponente $= \sqrt{3} \cdot I \cdot R$ dieser Längsspannung ist

charakterisiert dadurch, dass sie dem Strom entgegengesetzt gerichtet ist, und die Blindkomponente $+j \cdot \sqrt{3} \cdot X \cdot I$ dem Strom I um 90° nacheilt. Es ist also auch $Z_U = -Z_U$. In Fig. 1 ist $R = 0$ gedacht.

3. Der System-Längsstrom I ist der eigentliche Betriebsstrom, der längs der Leitung, also von A nach F fliesst.

4. Der System-Querstrom umfasst alle Ströme, die «quer» zur Leitungsrichtung fließen. Es sind also alle Ableitungs-, induktiven und kapazitiven Ströme, sowie zusätzliche Kondensatorströme darunter verstanden. In Fig. 1 ist die Konduktanz $G = 0$ gedacht.

Wir unterscheiden demnach Längs- und Quer-Impedanzen des Uebertragungssystems und werden die Vorteile einer derartigen Benennung sofort einsehen, sobald ein verwickeltes Uebertragungsproblem vorliegt. Es bedeutet ferner (siehe auch das elektrotechnische Achsenkreuz, Fig. 2):

- $+P$ = Wirkleistung, ausgedrückt durch $+kW$ bzw. $+MW$.
- $-P$ = Wirklast, ausgedrückt durch $-kW$ bzw. $-MW$.
- $+jP$ = Blindlast, ausgedrückt durch $+jkVA$ bzw. $+jMVA$, oder andere Symbolisierung für dieselbe:
- $+P_r$ = Blindlast, ausgedrückt durch $+kVAR$ bzw. $+MVAR$.
- $-jP$ = Blindleistung, ausgedrückt durch $-jkVA$ bzw. $-jMVA$, oder andere Symbolisierung für dieselbe:
- $-P_r$ = Blindleistung, ausgedrückt durch $-kVAR$ bzw. $-MVAR$.

P_{ki} = Kippwirkleistung; $-P_{ki}$ = Kippwirklast. P_{BGr} bzw. $-P_{BGr}$ = dynamische oder Betriebsgrenzleistung bzw. Last.

$I_{W1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1$ und $I_{W2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 =$ Wirkleistungsstrom am Anfang und am Ende der Leitung.

$I_{r1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1$ und $I_{r2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 =$ Blindlaststrom am Anfang und am Ende der Leitung.

Das Produkt $\sqrt{3} \cdot U \cdot I_r$ ergibt eine Blindlast $= +jP \equiv P_r$.

Das Produkt $\sqrt{3} \cdot U \cdot (-I_r)$ ergibt eine Blindleistung $= -jP \equiv -P_r$, siehe Fig. 2, worin $j = \sqrt{-1}$ der 90° -Operator ist.

Auf den Kilometer bezogene Konstanten pro Phase:

r = Resistanz in Ohm. $x = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L$ = die Induktanz in Ohm.

$z = \sqrt{r^2 + x^2}$ = die Längs-Impedanz in Ohm.

$\alpha = \arctg \frac{x}{r}$ = Impedanzwinkel.

g = Konduktanz in Siemens (S).

$b = \omega \cdot c$ = Kapazitätanz in Siemens (S).

$y = \sqrt{g^2 + b^2}$ = Admittanz in Siemens.

$\beta = \arctg \frac{b}{g}$ = Admittanzwinkel.

$k = y \cdot z$ = quadratische und komplexe Konstante der Wellenfortpflanzung. Es ist also:

$$\sqrt{k} = \alpha_D + j\beta_w = \text{Dämpfungsmass} + j \cdot \text{Winkelmass.}$$

$\delta = \alpha + \beta =$ der ihr zugeordnete Summenwinkel. Also ist: $\kappa = k \cdot \delta = z \cdot \alpha \cdot y \cdot \beta$.

ε_{ki} und $\varepsilon_{k\Omega}$ die relative induktive und Ohmsche Komponente der Kurzschlußspannung ε_k in $\%_0$ der Transformatoren-Nennspannung.

l = Abstand der Sende- und Empfangsstation in km.

$$\sigma = \frac{P_{ki}}{P_{BGr}} = 1,5 = \text{Ueberlastfaktor} = \frac{\text{statische Kippplast}}{\text{Betriebsgrenzlast}}, \text{ also wird die dynamisch stabile Betriebsgrenzlast } P_2^{(dy)} = P_{BGr} = \frac{P_{ki}}{\sigma} = 0,67 \cdot P_{ki}^{(st)}.$$

Der Ueberlastfaktor 1,5 ist ein in der Literatur vielfach angenommener Wert, dessen Zweckmässigkeit aber noch durch den praktischen Betrieb erwiesen werden müsste. Bis zur statischen Kippplast «fahren» darf man schon wegen der Erwärmung der Leitung und des dann zu gross werden Durchhanges nicht, oder nur für ganz kurze Zeit.

In diesem Aufsatz sind die Strom- und Spannungsvektoren im Interesse einer leichteren Verständlichkeit nur mit ihrem absoluten Werte gekennzeichnet. Der Vektorcharakter ist durch besondere Strom- und Spannungs Pfeile angedeutet.

C. Das elektrotechnische Achsenkreuz (Fig. 2).

Bei der Behandlung der modernen Energieübertragungsprobleme erweist es sich als notwendig, über ein geschlossenes graphisches System zur Darstellung von Wirk- und Blindleistung bzw. -Lasten zu verfügen — ein sogenanntes «elektrotechnisches Achsenkreuz», das identisch ist mit dem aus der Mathematik her bekannten Gausschen System der

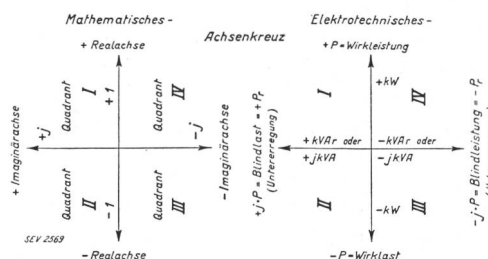


Fig. 2. Mathematisches und elektrotechnisches Achsenkreuz. Die um 90° gedrehte Angabe der Quadranten-Nummer soll den Leser sein gewohntes Achsenkreuz aus der Mathematik sofort erkennen lassen.

reellen und imaginären Zahlen. Aus Zweckmässigkeitsgründen ist letzteres um 90° vorwärts gedreht worden, damit die reelle $+Achse$ nach oben zeigt. Zu- und Abfluss von Wirk- und Blindenergie in irgend einem Verteilungspunkt können durch ein solch lückenloses System dargestellt werden. Dabei

sind *Wirk- und Blindleistung, Wirk- und Blindlast* sehr leicht verständliche und sich einprägbare Namen. Die Quadranteneinteilung bleibt dieselbe wie in der Mathematik, und alle ihre Lehrsätze sind direkt auf das elektrotechnische Achsenkreuz anwendbar, so dass man sich an nichts neues zu gewöhnen hat. Man stosse sich nicht daran, dass z. B. die Blindleistung ein anderes Vorzeichen hat als die Wirkleistung. Plus- und Minuszeichen haben ebenso die Bedeutung der Namengebung als die der rechnerischen Symbole. Die *Vorteile der korrekten Uebereinstimmung zwischen mathematischem und elektrotechnischem Achsenkreuz* sind grösser als die nur scheinbaren Nachteile durch verschiedene Vorzeichen.

Die Darstellung nach Fig. 2 erübrigt auch ein für allemal das Operieren mit oft zu Irrtümern führenden Ausdrücken, wie induktive und kapazitive Blindleistung bzw. Blindlast; ferner werden die sprachlich und technisch nicht einwandfreien Redensarten, wie « $\cos \varphi$ voreilend», « $\cos \varphi$ nacheilend», überflüssig.

D. Leistungs- und Lastkurve, sowie Stabilitätsdiagramm einer verlustlosen und ungesättigten Vollpol-Synchronmaschine beim Motor- und Generatorbetrieb (Fig. 3).

Der Scheitelpunkt der Motorlastkurve stellt den kritischen oder Kipp-Punkt des Betriebes dar, wo

der Differentialquotient $\frac{d(-P)}{d\vartheta} = 0$ ist. Die Ordinate symbolisiert die Kipplast des Motors, und die Abszisse den Kippwinkel ϑ_{ki} desselben. Der Kipp-Punkt beim Generatorbetrieb hingegen ist charakterisiert durch den Differentialquotienten $\frac{d(+P)}{d\vartheta} = 0$. Für den stabilen Betrieb ist letzterer > 0 (Ausgezogener Ast); für den labilen Betrieb ist letzterer < 0 (Gestrichelter Ast).

In Fig. 3 ist durch die schwach strichlierte Kurve die synchronisierende Leistung P_s bzw. die *Synchronkraft* F_s in Funktion von ϑ als *Cosinuskurve* dargestellt. Man sieht wie P_s bei Erreichung des Kipp-Punktes zu Null und bei Ueberschreitung desselben sogar negativ, d. h. zur *desynchronisierenden Leistung* $-P_s$ wird.

Links oben in Fig. 3 sind die typischen Kurven von Leistung und Synchronkraft der Vollpol- und Schenkelpolmaschine in Funktion des Stabilitätswinkels ϑ angegeben. Wir sehen daraus, dass bei Turbogeneratoren die Synchron- oder takthaltende Kraft schon für $\vartheta = 90^\circ$ auf Null sinkt, während bei den Schenkelpolgeneratoren dies erst in der Nähe von $\vartheta = 120^\circ$ der Fall ist, was auf die unterschiedliche Ankerinduktanz in der Längs- und Querrichtung des Hauptflusses zurückgeführt werden kann. Deshalb erhält man für die Leistungskurve der

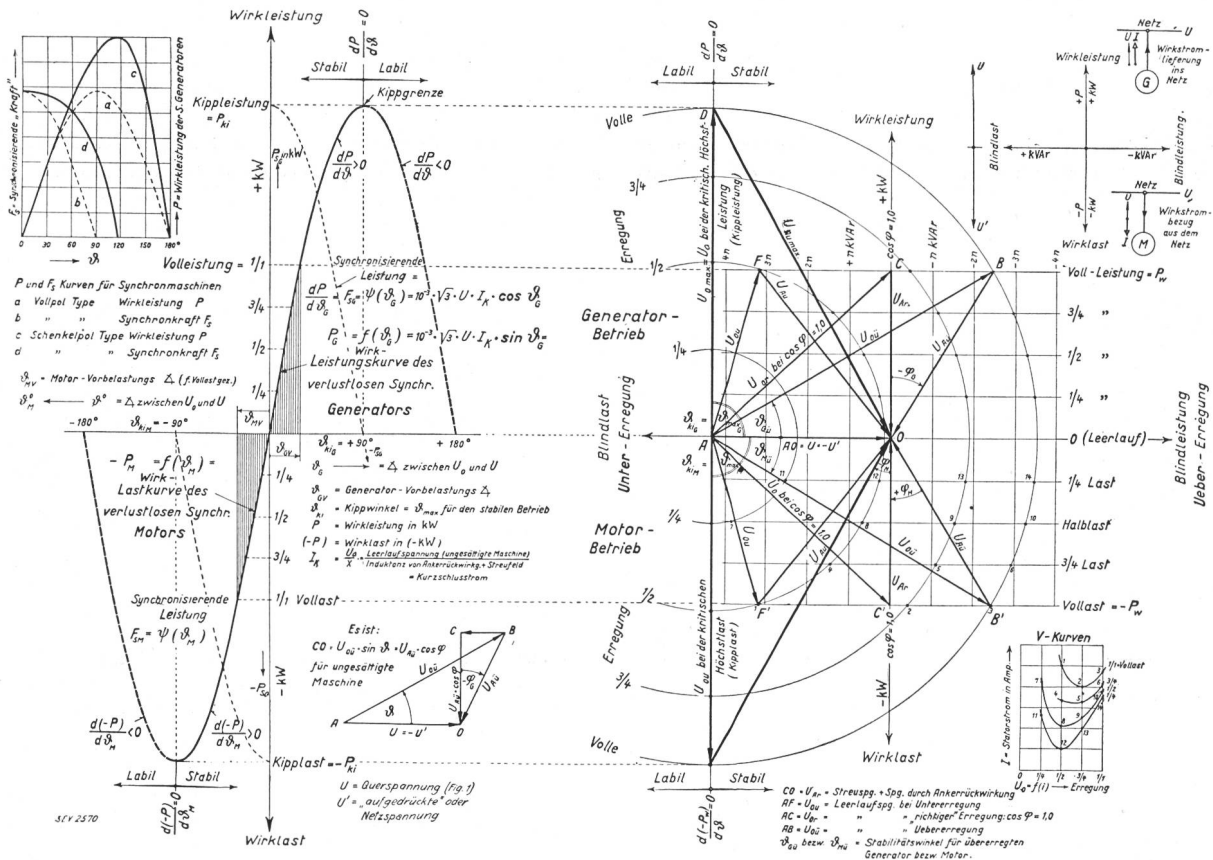


Fig. 3. Stabilitätsdiagramm und Leistungskurven einer verlustlosen und ungesättigten Vollpol-Synchronmaschine beim Motor- und Generatorbetrieb. (Anstatt F_{SG} und F_{SM} lies: P_{SG} und P_{SM}).

Schenkelpoltype keine reine Sinuskurve mehr, und infolgedessen ist die durch ihre Differentiation erhaltene Synchronkraftkurve keine reine Cosinuskurve. In bezug auf Stabilität verhalten sich die letzteren Typen also etwas günstiger als die Vollpol-Synchronmaschinen.

Rechts in Fig. 3 ist das typische Betriebsdiagramm der verlustlosen, ungesättigten Vollpol-Synchronmaschine, das auch die Stabilitätsgrenze ersehen lässt, für verschiedene Erregungen angegeben und zwar für den Generator- und Motorbetrieb. Die Bohrungsspannung durch Amarrückwirkung und die Statorstreuungspannung sind in einem Vektor U_A zusammengefasst und für einige typische Betriebszustände (Unter-, Richtige und Uebererregung) dargestellt. Man sieht in Fig. 3 wieder das ganze Betriebsdiagramm in das elektrotechnische Achsenkreuz logisch eingeordnet, was ein rasches Verständnis solcher Diagramme wesentlich erleichtert. Schliesslich ist unten noch das charakteristische Spannungsdreieck der Synchronmaschine angegeben, um ein rasches Sicheinfinden in das komplizierter erscheinende Betriebsdiagramm zu ermöglichen.

E. Schematische und diagrammatische Darstellung der Generator- und Motorpolrad-Stellungen und Stabilitätswinkel bei verschiedenen Belastungen, nebst den von Stator und Rotor induzierten Spannungen und daraus resultierenden Synchronkräften (Fig. 4).

Beim Studium der Stabilität von Synchronmaschinen und Uebertragungsleitungen ist es stets wichtig, sich zu vergegenwärtigen, dass es auf die relative Polradlage der elektrisch untereinander verbundenen Maschinen ankommt, da diese Pol-

radlage die takthaltende- oder Synchronkraft festlegt. Die 5 Gegenüberstellungen in Fig. 4 für typische Belastungszustände mit den darunter stehenden Vektordiagrammen für ein Generator-Leitung-Motorübertragungssystem dürfte anschaulich dartun, welche Rolle die Polradlage in Stabilitätsuntersuchungen spielt. Es bedeutet der Fall

- a) Leerlauf;
- b) Vollast;
- c) Dynamische Grenzlast;
- d) Statische Grenz- oder Kipplast;
- e) Labile Last.

Von diesen 5 Fällen interessieren uns speziell c), d) und e). Bei Fall c), wo die statisch steigerbare Last noch 50 % ist, beträgt der Stabilitätswinkel $\vartheta = 42^\circ$, die synchronisierende Leistung P_s ist noch positiv. Bei Fall d) ist die Kipplast P_{ki} und der Kippwinkel ϑ_{ki} erreicht, die synchronisierende Leistung P_s ist glänzlich verschwunden. Bei Fall e) schliesslich hat die äussere Last $-P$ den Motor in das labile Betriebsgebiet gebracht, wo die desynchronisierende Leistung $-P_s$ auftritt, welche die Pole bis zum schlimmsten Fall der EMK-Opposition auseinander reisst.

F. Anschauliche Darstellung der Bedeutung der statischen und dynamischen Stabilität von elektrischen Uebertragungssystemen an Hand eines mechanischen Analogiemodells.

Um das Wesen der Stabilität richtig zu verstehen, d. h. um eine klare Vorstellung von der Zusammenhangskraft zwischen Synchrongenerator und Synchronmotor, sowie der Bedeutung des Stabilitätswinkels ϑ zu gewinnen, wollen wir versuchen, eine Analogie zwischen den stabilitätsbedingenden elektrischen Grössen und einem mechani-

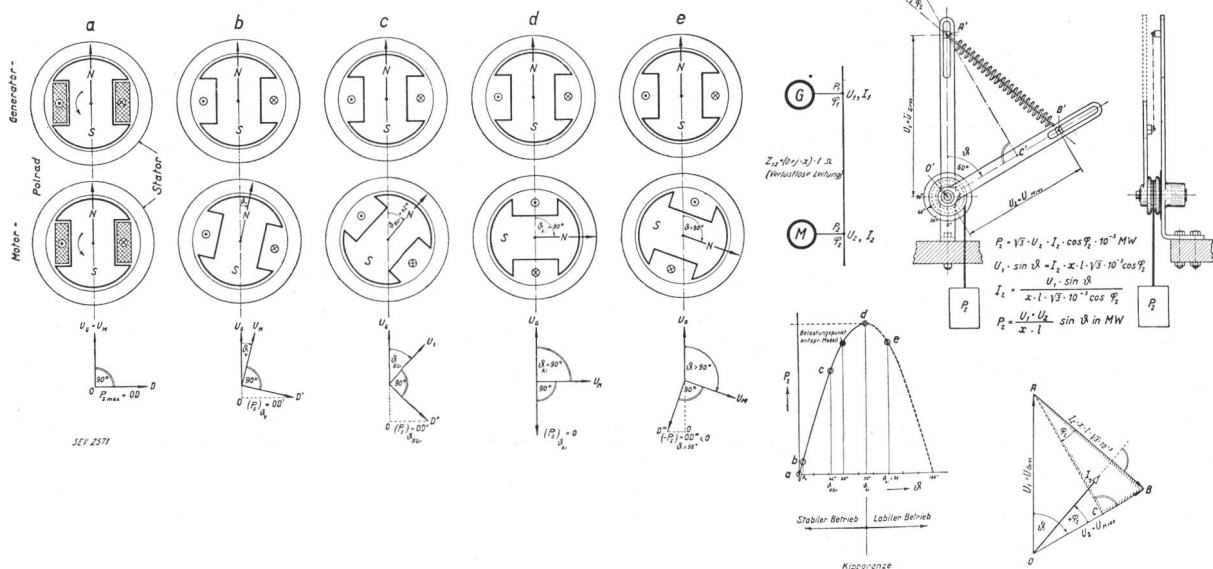


Fig. 4.

Typische Motorpolrad-Generatorpolrad-Stellungen und Vektordiagramme für verschiedene Belastungsfälle von Leerlauf bis Kippüberlast. Darstellung der Leistung P_s .

a = Leerlauf, b = Vollast, c = Betriebsgrenzlast, d = Kipplast, e = Kippüberlast.

(Die Verbindungsleitung zwischen Generator und Motor ist verlustlos gedacht.)

Mechanisches Analogiemodell zur Darstellung der statisch stabil übertragbaren Wirkleistung und der dabei notwendigen Blindleistung und Vergleich mit dem Vektordiagramm.

schen Modell zu schaffen. Es ist das Verdienst des Amerikaners S. B. Griscom, zuerst auf die Möglichkeit, mechanische Apparate zur Lösung der immer komplizierter werdenden Stabilitätsprobleme zu verwenden, hingewiesen zu haben. Beim Zusammenschluss von mehreren Grossleistungsnetzen würden die Rechnungen so verwickelt, weil sehr viele einflussreiche Grössen berücksichtigt werden müssen, dass eine direkte Lösung der Stabilitätsaufgaben geradezu unmöglich wird und nur durch langwieriges Probieren bewerkstelligt werden kann. Schon wenn drei Grosskraftwerke zusammen parallel arbeiten müssen und plötzliche Störungen, Zu- und Abschalten einer Leitung, momentan auftretende Belastungsstösse der Anlage zugemutet werden, wird die Berechnung der Winkelschwingungen der EMK-Vektoren so schwierig, dass nur *kinematographische Aufnahmen* die kurzzeitigen Vorgänge mittels eines Analogiemodells korrekt wiedergeben können.

Das rechts in einfachster Darstellung gezeichnete Modell in Fig. 4 symbolisiert nun folgende elektrische Grössen:

symbolisieren wir die statischen oder stossweisen Belastungsänderungen, die in einem elektrischen Uebertragungssystem auftreten können, und erkennen daran die statischen oder dynamischen Stabilitätserscheinungen. Je nach der Zahl der zusammengeschlossenen Kraftwerke werden Hebelarme am Modell angebracht. An Hand eines Betriebs- und Störungs-«Fahrplanes» können die Erscheinungen bei statischer und dynamischer Laständerung, mit welcher möglicherweise zu rechnen ist, *mittels Modell und kinematographischen Aufnahmen* schon bei der Projektierung, also zum voraus sorgfältig studiert werden, so dass man dann im wirklichen Betrieb mit absoluter Sicherheit die Aufrechterhaltung der synchronen Zusammenarbeit erwarten kann. Die rasch vor sich gehenden Winkelschwingungen können auch mittels Zeitlupe derart verlangsamt werden, dass das menschliche Auge den Ausschlägen der Hebelarme leicht zu folgen imstande ist.

Man kann das Modell natürlich auch so einrichten, dass der die resultierende Generator-EMK

Elektrisches System	Mechanische Analogie
<p>a) Aus Stator und Rotor resultierende Spannung des Generators: $U_G = OA$. Durch Verschiebung des Gleitstückes in der Gleitbahn kann sie (symbolisch) geändert werden;</p> <p>b) Impedanzspannung des Systems = AB;</p> <p>c) Leitungstrombelastung;</p> <p>d) Aus Stator und Rotor resultierende Spannung des Motors $U_M = OB$. Durch Verschiebung des Gleitstückes in der Gleitbahn kann sie (symbolisch) geändert werden;</p> <p>e) Uebertragene Wirkleistung: (OB) mal (AC) im Vektordiagramm.</p> <p>f) Erforderliche Blindleistung in der Empfangsstation: (OB) mal (BC) im Vektordiagramm;</p> <p>g) Stabilitätswinkel ϑ zwischen U_1 und U_2 bzw. U_G und U_M;</p> <p>h) Motorbelastung;</p> <p>i) Kinetische Energie der Generator- und Motorpolräder.</p>	<p>a) Der senkrecht stehende Hebelarm vom Drehpunkt bis zum Angriffspunkt der Feder = $O'A'$.</p> <p>b) Federlänge = $A'B'$.</p> <p>c) Federspannung;</p> <p>d) Der bewegliche geneigte Hebelarm vom Drehpunkt bis zum Angriffspunkt der Feder = $O'B'$.</p> <p>e) Drehmoment des beweglichen Hebelarmes, Produkt aus Hebelarmlänge und Komponente der Federspannung, die senkrecht auf dem Arm steht, also $(O'B')$ mal (A,C) im Modell;</p> <p>f) Produkt aus Hebelarmlänge und Komponente der Federspannung in Richtung des Hebelarmes, also $(O'B')$ mal $(B'C')$ im Modell;</p> <p>g) Verschiebung der Hebelarme um ihren gemeinsamen Drehpunkt;</p> <p>h) Gewicht mal Radius der Seilrolle;</p> <p>i) Massenträgheit von Hebelarmen und Seilrollen.</p>

Um die Federspannung direkt ablesbar zu machen, könnte man ein Dynamometer «in Reihe» mit der Feder schalten, oder einfacher, die Federlänge in kV ausgedrückt auf einem passend angebrachten Maßstab hinter der Feder anbringen. Mit diesem Griscomschen Analogiemodell lassen sich die Stabilitätserscheinungen eines Uebertragungssystems sehr schön überblicken.

Je nachdem wir das Gewicht ruhig auflegen oder rasch in die «Wagschale» des Modelles werfen,

darstellende Hebelarm ebenfalls beweglich um den Drehpunkt rotieren muss und von einem Seilrollenmoment im Gleichgewicht gehalten wird. Wenn mehrere Kraftwerke zu symbolisieren sind, ist dies sogar die zweckmässige Anordnung. Die Darstellung mit dem feststehenden senkrechten Hebelarm in Figur 4 rechts haben wir nur deshalb gegeben, damit sie in logischer Relation zu den fünf Polradstellungen von Motor und Generator in Fig. 4 links stehe.

(Fortsetzung folgt.)