Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 58 (1967)

Heft: 16

Artikel: Die Reaktanzen der Synchronmaschine in anschaulicher Darstellung

Autor: Gärtner, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916275

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: 20.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Die Reaktanzen der Synchronmaschine in anschaulicher Darstellung

Von *R. Gärtner*, Berlin

Prof. Dr. techn. Franz Unger zu seinem 85. Geburtstag gewidmet

621.313.32.011.23

Der vorliegende Aufsatz richtet sich in erster Linie an die Fachleute von Nachbargebieten, die gelegentlich mit den Reaktanzen der Synchronmaschine zu tun haben, ohne selbst Maschinenspezialisten zu sein. Er soll ein gewisses Gefühl für die physikalische Realität der Reaktanzen und ihre Grössenverhältnisse vermitteln. Dementsprechend kommt es mehr auf Anschaulichkeit als auf Genauigkeit an.

Eine anschauliche Darstellung der Reaktanzen gelingt mit Hilfe der magnetischen Leitwerte. Die Haupt- und Streureaktanzen sind den magnetischen Haupt- und Streuleitwerten proportional. Skizziert man die Flusspfade der Haupt- und Streuflüsse in das Querschnittsbild der Maschine ein, dann gewinnt man aus ihren magnetischen Leitwerten — es genügt die Betrachtung ihrer Luftanteile — ein anschauliches Bild der zugehörigen Haupt- und Streureaktanzen.

Für die Herleitung der Formeln, nach denen sich die verschiedenen Maschinenreaktanzen aus Haupt- und Streureaktanzen zusammensetzen, ist die Betrachtungsweise der stillstehenden Maschine in der Art eines Transformatormodells vorteilhaft. Je nachdem, ob man die Feldwicklung als Sekundärwicklung offen oder kurzgeschlossen annimmt bzw. den Dämpfer zusätzlich berücksichtigt, erhält man die synchrone oder transiente bzw. subtransiente Reaktanz. Je nach Lage des stillstehend gedachten Poles in der Durchflutungsachse der Ankerwicklung oder elektrisch senkrecht dazu ergeben sich die Längs- oder Querreaktanzen.

Le présent article s'adresse en premier lieu aux spécialistes des domaines adjacents, s'occupant occasionellement des réactances des machines synchrones, sans pour autant se prétendre experts en matière de machines. L'exposé doit conférer un certain discernement de la réalité physique des réactances et de leurs ordres de grandeur et se base de ce fait davantage sur des représentations que sur des données exactes.

Une telle représentation évidente des réactances est réalisée au moyen des perméances magnétiques. Les réactances principales et de fuite sont proportionnelles aux perméances principales et de fuite. Si l'on esquisse le tracé des flux principaux et de fuite dans la vue en coupe de la machine, les perméances magnétiques fournissent au simple examen de leur part d'air une image très représentative des réactances principales et de fuite correspondantes.

Pour l'établissement des formules spécifiant le rapport des réactances principales et de fuite des diverses réactances des machines, il est avantageux de ne considérer que des machines arrêtées, constituant en quelque sorte des modèles de transformateurs. En assimilant dès lors la bobine inductrice à un enroulement secondaire, soit ouvert, soit court-circuité, resp. en considérant en outre l'amortissement, on obtient la réactance synchrone ou transitive, resp. subtransitive. Suivant l'orientation du pôle, présumé immobile, dans l'axe du trajet du flux du bobinage d'induit, ou selon un plan électrique perpendiculaire à ce dernier, on détermine des réactances longitudinales ou perpendiculaires.

1. Problemstellung

Mit den Reaktanzen der Synchronmaschine haben nicht nur die Maschinenspezialisten zu tun, sondern auch die Fachleute verschiedener Nachbargebiete, z.B. Netzplaner, Schutztechniker, Schalterbauer u.a. Für diesen weiteren Kreis sind die folgenden Betrachtungen in erster Linie bestimmt. Es soll versucht werden, das Wesen der Maschinenreaktanzen über den Rahmen der formalen Handhabung hinaus möglichst einfach und anschaulich darzustellen.

2. Benützte Buchstabensymbole

2.1 Grössensymbole

I Strom
N Windungszahl
U Strangspannung
X Reaktanz
x relative Reaktanz
Λ magnetischer Leitwert
Φ magnetischer Fluss
ω Kreisfrequenz

2.2 Symbole für Indizes

a Ankerwicklung
D Dämpfer in der Direktachse (Längsachse, Polachse)
d Direktachse (Längsachse, Polachse), Ankerwicklung in der Direktachse
f Feldwicklung
h Hauptfluss, Hauptleitwert, Hauptreaktanz
k Kurzschluss
Q Dämpfer in der Querachse (Pollücke)
q Querachse (Pollücke), Ankerwicklung in der Querachse
s Streufluss, Streuleitwert, Streureaktanz
$'$ transient (Übergang)
$''$ subtransient (Anfang)

3. Verlauf des Kurzschlußstromes

Eine der bekanntesten Auswirkungen der Maschinenreaktanzen ist der Verlauf des Kurzschlußstromes einer Synchronmaschine (Fig. 1). Ein abklingender Wechselstrom ist einem abklingenden Gleichstrom überlagert. Der Gleichstromanteil hängt in seiner Grösse von dem Zufall des Einschaltmomentes ab und klingt auf Null ab. Der Wechselstromanteil beginnt bei dreipoligem Klemmenkurzschluss nach Leerlauf mit dem Anfangs-Kurzschlusswechselstrom:

$$I_k'' = \frac{U}{X_d''} \tag{1}$$

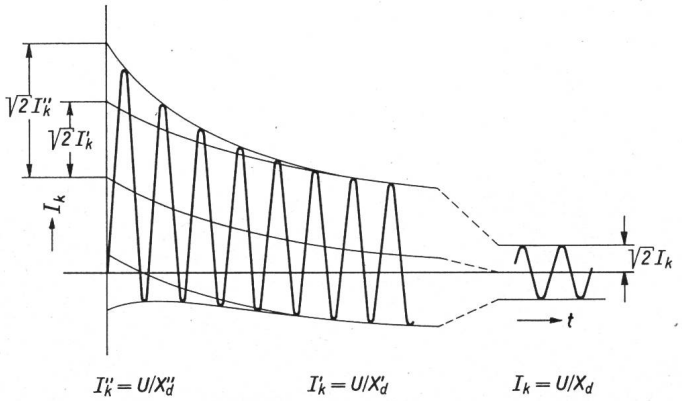

Fig. 1
Verlauf des Kurzschlußstromes I_k einer Synchronmaschine bei Klemmenkurzschluss nach Leerlauf
t Zeit

Er klingt zunächst schnell mit der subtransienten Kurzschluss-Zeitkonstante T_d'' auf den Übergangs-Kurzschlusswechselstrom ab:

$$I_k' = \frac{U}{X_d'} \tag{2}$$

und dann langsamer mit der transienten Kurzschluss-Zeitkonstante T_d' auf den Dauerkurzschlußstrom:

$$I_k = \frac{U}{X_d} \tag{3}$$

Dabei ist gleichbleibende Leerlauferregerspannung vorausgesetzt. Dem abklingenden Kurzschlusswechselstrom entspricht eine zunehmende Reaktanz der Maschine, beginnend mit der kleinsten subtransienten oder Anfangs-Reaktanz X_d'' über die grössere transiente oder Übergangs-Reaktanz X_d' bis zur größten synchronen oder Anker-Reaktanz X_d.

Die Veränderlichkeit der Maschinenreaktanz hängt mit der Tatsache zusammen, dass sich anfangs der Dämpfer und die Feldwicklung in der Art von kurzgeschlossenen Sekundärwicklungen an dem Ausgleichvorgang beteiligen, dass aber dann diese Beteiligung zuerst im Dämpfer und später auch in der Feldwicklung nachlässt und schliesslich ganz aufhört. Die Maschine ist in dieser Hinsicht vergleichbar mit einem Transformator, der bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung eine kleine, bei offener Sekundärwicklung aber eine grosse Reaktanz hat. Im Gegensatz zum Transformator verläuft edoch bei der Maschine der Übergang stetig und ohne Umschaltung, denn der Dämpfer und die Feldwicklung sind als geschlossene Wicklungen ständig vorhanden, sie werden aber nur am Anfang durch die Grössenänderung des magnetischen Flusses induktiv beeinflusst, später dagegen nicht mehr, wenn das synchron rotierende Drehfeld seinen konstanten Endwert angenommen hat.

Das zuerst schnelle, dann langsamere Tempo beim Abklingen des Kurzschlußstromes ist eine Folge der magnetischen Kopplung zwischen Dämpfer und Feldwicklung. Die kleine subtransiente Kurzschluss-Zeitkonstante T_d'' und die große transiente Kurzschluss-Zeitkonstante T_d' sind die beiden Wurzeln einer quadratischen Gleichung, die sich bei der mathematischen Beschreibung dieses Vorganges ergibt.

4. Synchrone Längsreaktanz X_d

Bei Leerlauf der Synchronmaschine erzeugt der Erregerstrom (Feldstrom) I_f den Hauptfluss in der Polachse (Längsachse, Direktachse):

$$\Phi_{hd} = I_f N \Lambda_{hd} \tag{4}$$

N ist die Windungszahl der Feldwicklung pro Pol.

Für die folgenden Betrachtungen ist es zweckmässig, alle Grössen auf den Anker zu beziehen. I_f bedeutet also von nun an den auf die Ankerwicklung umgerechneten Feldstrom und N die Ankerwindungszahl. Eine genauere Definition der Ankerwindungszahl im Hinblick auf die Schaltung der Ankerwicklung, ihre Verteilung am Ankerumfang und das Zusammenwirken der drei Stränge ist in diesem Zusammenhang nicht erforderlich.

Der Hauptfluss Φ_{hd} induziert in der Ankerwicklung die Strangspannung:

$$U = \omega N \Phi_{hd} \tag{5}$$

oder mit Gl. (4):

$$U = \omega N^2 \Lambda_{hd} I_f \tag{6}$$

$N^2 \Lambda_{hd}$ ist gleich der Induktivität L_{hd} des Hauptflusspfades und ωL_{hd} gleich der zugehörigen Reaktanz X_{hd}, der Hauptreaktanz in der Polachse.

$$X_{hd} = \omega N^2 \Lambda_{hd} \tag{7}$$

Damit erhält Gl. (6) die Form:

$$U = I_f X_{hd} \tag{8}$$

Bei Leerlauf tritt U an den Klemmen der Maschine in Erscheinung. Bei Klemmenkurzschluss ist U dagegen nur eine innere EMK, die sog. Polradspannung, die durch den Spannungsabfall des Kurzschlußstromes I_k an der Hauptreaktanz X_{hd} und der Ankerstreureaktanz X_{sa} aufgezehrt wird:

$$U = I_k (X_{hd} + X_{sa}) \tag{9}$$

Der Ohmsche Spannungsabfall in der Ankerwicklung grosser Synchronmaschinen ist in diesem Zusammenhang vernachlässigbar. Gl. (9) gilt für Dauerkurzschluss mit Leerlauferregung.

Durch Vergleich von Gl. (9) mit Gl. (3) erkennt man, dass der Klammerausdruck in Gl. (9) die synchrone Längsreaktanz X_d ist.

$$X_d = X_{hd} + X_{sa} \tag{10}$$

Sie setzt sich zusammen aus der Hauptreaktanz X_{hd} als Mass für die Ankerrückwirkung und der Ankerstreureaktanz X_{sa} als Mass für die Ankerstreuung.

5. Veranschaulichung der Reaktanzen durch die magnetischen Leitwerte

Nach Gl. (7) ist die Hauptreaktanz X_{hd} proportional dem magnetischen Leitwert Λ_{hd} des Hauptflusses. Analog ist die Ankerstreureaktanz X_{sa} proportional dem magnetischen Leitwert Λ_{sa} des Ankerstreuflusses. Zur Veranschaulichung der synchronen Längsreaktanz X_d bzw. ihrer beiden Anteile X_{hd} und X_{sa} zeichnet man demnach die Flusspfade des Hauptflusses Φ_{hd} und des Ankerstreuflusses Φ_{sa} in das Querschnittsbild der Maschine ein, wie es in Fig. 2 schraffiert angedeutet ist.

Zur überschlägigen Beurteilung der magnetischen Leitwerte genügt die Betrachtung des Luftanteiles der Flusspfade; denn dort ist der Hauptanteil des magnetischen Widerstandes. Der Hauptfluss Φ_{hd} hat z.B. im Luftspalt einen grossen Querschnitt zur Verfügung und nur eine kurze Luftstrecke zu überbrücken; sein Leitwert Λ_{hd} ist daher verhältnismässig gross. Der Ankerstreufluss Φ_{sa} hat dagegen bei kleinerem Quer-

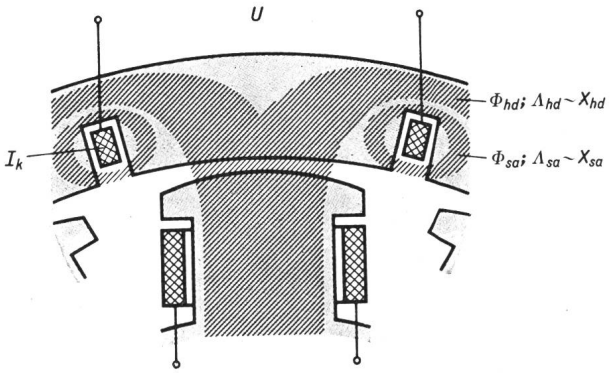

Fig. 2
Synchrone Längsreaktanz $X_d = X_{hd} + X_{sa}$

schnitt eine längere Luftstrecke zu überwinden (wobei er in Wirklichkeit nicht nur eine Nut wie in der vorliegenden schematischen Darstellung, sondern mehrere Nuten nacheinander überbrücken muss); sein Leitwert Λ_{sa} ist dementsprechend kleiner. In demselben Verhältnis ist die Ankerstreureaktanz X_{sa} kleiner als die Hauptreaktanz X_{hd}.

Auf ähnliche Weise kann man auch die übrigen Maschinenreaktanzen bzw. die Haupt- und Streureaktanzen, aus denen sie sich zusammensetzen, anschaulich darstellen. Alle Haupt- und Streureaktanzen sind im gleichen Verhältnis proportional den magnetischen Haupt- und Streuleitwerten.

Dieses Verfahren dient nicht den Spezialisten zur Berechnung der Reaktanzen, sondern — wie bereits erwähnt — in erster Linie den Nichtspezialisten zur Veranschaulichung. Es liefert keine Zahlenwerte für die Reaktanzen, auch keine angenäherten, sondern soll nur ein gewisses Gefühl für ihre gegenseitigen Grössenverhältnisse vermitteln. Zu diesem Zweck wird so weit wie möglich vereinfacht, bis nur das Wesentlichste übrig bleibt. In diesem Sinne genügt es, die Flusspfade nach Augenmass zu skizzieren. Es genügt, nur die Luftanteile der Flusspfade zu berücksichtigen und den magnetischen Leitwert aus dem mittleren Querschnitt durch die mittlere Länge dieser Luftanteile abzuschätzen; wiederum nicht als Zahlenwert, sondern nur im Verhältnis zu anderen magnetischen Leitwerten. Die Eisenanteile der Flusspfade dürfen unberücksichtigt bleiben, womit auch der Sättigungseinfluss vernachlässigt wird. Ebenso kann alles unberücksichtigt bleiben, was ausserhalb der Zeichenebene liegt, z.B. die Wickelkopfstreuung.

Für die Betrachtung der folgenden Maschinenreaktanzen muss man wissen, welche Haupt- und Streuleitwerte zu ihrer Veranschaulichung jeweils in Betracht kommen, d.h. aus welchen Haupt- und Streureaktanzen sie sich zusammensetzen.

Die Formeln hiefür sind bekannt. Sie sollen aber hier nicht als bekannt vorausgesetzt, sondern der Vollständigkeit halber — ähnlich wie Gl. (10) für X_d — aus den physikalischen Zusammenhängen hergeleitet werden. Hiezu empfehlen sich noch folgende Vereinfachungen.

6. Unerregte, synchron laufende Maschine am Netz

Gl. (9) bleibt unverändert, wenn U nicht als innere Polradspannung vom Erregerstrom I_f erzeugt wird, sondern als äussere Spannung an die Klemmen der unerregten und unbelasteten synchron laufenden Maschine angelegt wird. Spannungsquelle und Kurzschlußstelle haben nur ihre Plätze vertauscht: Vorher war die treibende Spannung innen (die Polradspannung) und der Kurzschluss aussen (an den Klemmen); jetzt ist die treibende Spannung aussen (an den Klemmen) und der Kurzschluss gewissermassen innen (da die unerregte Maschine keine Gegen-EMK entgegensetzt). Vorher lieferte die Maschine den Kurzschlußstrom I_k hinaus in den Kurzschluss; jetzt fliesst er in gleicher Grösse aus dem Netz in die Maschine herein. Massgebend für die Grösse des Kurzschlußstromes ist nach wie vor die synchrone Reaktanz:

$$X_d = X_{hd} + X_{sa}$$

denn nach Fig. 2 hält die vom Hauptfluss:

$$\Phi_{hd} = I_k N \Lambda_{hd}$$

und vom Ankerstreufluss:

$$\Phi_{sa} = I_k N \Lambda_{sa}$$

in der Ankerwicklung induzierte Spannung:

$$\omega N (\Phi_{hd} + \Phi_{sa}) = I_k (X_{hd} + X_{sa})$$

der angelegten Netzspannung U das Gleichgewicht.

So betrachtet ist die synchrone Reaktanz X_d die Reaktanz der synchron laufenden Maschine, wenn sie unerregt an das Netz angeschlossen wird.

Nach Fig. 2 ist nur die Ankerwicklung stromdurchflossen. Die Reaktanz der Maschine ist in diesem Falle also die *Reaktanz der Ankerwicklung*. Man nennt die synchrone Reaktanz deshalb auch *Ankerreaktanz*.

7. Stillstehende Maschine

Man kann noch einen Schritt weitergehen mit der Vereinfachung der Betrachtungsweise:

An Gl. (9) und an Fig. 2 ändert sich nämlich weiterhin nichts, wenn man die Maschine stillstehend annimmt und die Ankerwicklung an eine einphasige Wechselspannung U angeschlossen denkt. (Einzelheiten über den Anschluss der Drehstromwicklung an eine einphasige Wechselspannung sollen hier nicht näher erörtert werden.) Man muss nur dafür sorgen, dass der stillstehende Läufer durch das Wechselfeld strommässig ebenso unbeeinflusst bleibt wie vorher bei seinem Synchronlauf mit dem Drehfeld. Zu diesem Zweck muss entsprechend Fig. 2 die Feldwicklung offen sein, die Maschine darf keinen Dämpfer haben, und alle sonstigen dämpfenden Kreise des Läufers sind zu vernachlässigen. Die letzte Bedingung ist wegen der immer vorhandenen Wirbelströme in der Praxis nie ganz zu verwirklichen. Das wäre zwar ein Hindernis für die Messung, spielt aber im vorliegenden Fall keine Rolle; denn hier handelt es sich nicht um einen wirklichen Versuch, sondern um ein Gedankenexperiment.

Der Übergang zur stillstehenden Maschine vereinfacht die Überlegungen durch den Wegfall der rotatorischen Probleme. Es bleiben nur noch die transformatorischen Probleme übrig, und die Maschine wird zu einem Transformatormodell. Die Ankerwicklung ist als Primärwicklung an die Wechselspannung U angeschlossen; die Feldwicklung und der Dämpfer sind die Sekundärwicklungen.

Die synchrone Reaktanz ist in dieser Betrachtungsweise die Reaktanz des leerlaufenden Transformatormodells, d.h. der stillstehenden Maschine mit offener Feldwicklung und ohne Dämpfer und sonstige dämpfende Kreise im Läufer. Wenn die Achse des stillstehenden Poles (Längsachse, Direktachse) wie in Fig. 2 mit der Durchflutungsachse der Ankerwicklung

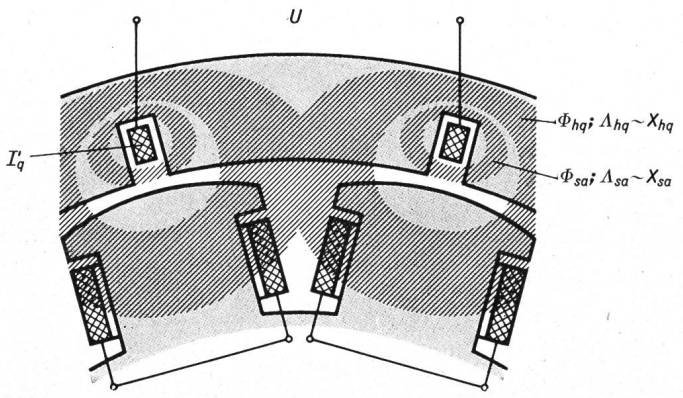

Fig. 3
Synchrone Querreaktanz $X_q = X_{hq} + X_{sa}$

zusammenfällt, dann ergibt sich die *Längs*reaktanz, in diesem Falle also die synchrone Längsreaktanz X_d.

8. Synchrone Querreaktanz X_q

Der Kurzschlußstrom ist ein fast reiner Blindstrom, und seine Durchflutungsachse fällt praktisch mit der Polachse zusammen. Für den Kurzschlußstrom sind daher nur die Längsreaktanzen maßgebend. Ein Belastungsstrom hat dagegen in der Regel eine andere Phasenlage. Er kann im allgemeinen in eine Längskomponente I_d und eine Querkomponente I_q zerlegt werden. Für die Längskomponente gelten die Längsreaktanzen, für die Querkomponente die Querreaktanzen.

Die synchrone Querreaktanz X_q erhält man, wenn man das Polrad der stillstehend gedachten Maschine so dreht, dass nach Fig. 3 die Querachse (Pollücke) mit der Achse der Ankerdurchflutung zusammenfällt. Der angelegten Spannung U wird dann das Gleichgewicht gehalten durch eine Gegenspannung, die vom Hauptfluss in der Querachse:

$$\Phi_{hq} = I_q N \Lambda_{hq}$$

und vom Ankerstreufluss:

$$\Phi_{sa} = I_q N \Lambda_{sa}$$

in der Ankerwicklung induziert wird:

$$U = I_q (X_{hq} + X_{sa}) \tag{11}$$

Daraus folgt analog zu Gl. (9) und (10) die synchrone Querreaktanz

$$X_q = X_{hq} + X_{sa} \tag{12}$$

9. Transiente Längsreaktanz X_d'

Die transienten Vorgänge sind gekennzeichnet durch die Beteiligung der Feldwicklung an den Ausgleichsvorgängen.

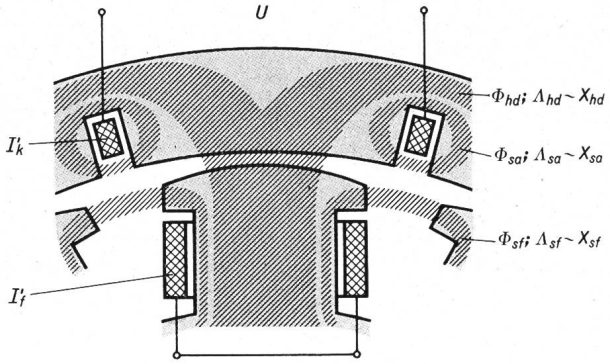

Fig. 4
Transiente Längsreaktanz $X_d' \approx X_{sa} + X_{sf}$

Dementsprechend muss im Transformatormodell die Feldwicklung als Sekundärwicklung kurzgeschlossen werden. Die transiente Reaktanz ist demnach in dem Gedankenexperiment die Reaktanz der stillstehenden Maschine mit kurzgeschlossener Feldwicklung, aber ohne Dämpfer und sonstige dämpfende Kreise im Läufer. Das Polrad wird nach Fig. 4 wieder in die Längslage gedreht, um die Längsreaktanz zu erhalten.

Der Hauptfluss Φ_{hd} wird von der Durchflutungsdifferenz des Stromes I_k' in der Ankerwicklung und des Stromes I_f' in der Feldwicklung erregt:

$$\Phi_{hd} = (I_k' - I_f') N \Lambda_{hd}$$

Er induziert in beiden Wicklungen die Spannung $(I_k' - I_f') X_{hd}$. In der Ankerwicklung hält diese Spannung gemeinsam mit der vom Ankerstreufluss

$$\Phi_{sa} = I_k' N \Lambda_{sa}$$

induzierten Spannung $I_k' X_{sa}$ der angelegten Netzspannung U das Gleichgewicht:

$$U = (I_k' - I_f') X_{hd} + I_k' X_{sa} \tag{13}$$

In der kurzgeschlossenen Feldwicklung heben sich die vom Haupt- und Streufluss induzierten Spannungen auf:

$$(I_k' - I_f') X_{hd} - I_f' X_{sf} = 0 \tag{14}$$

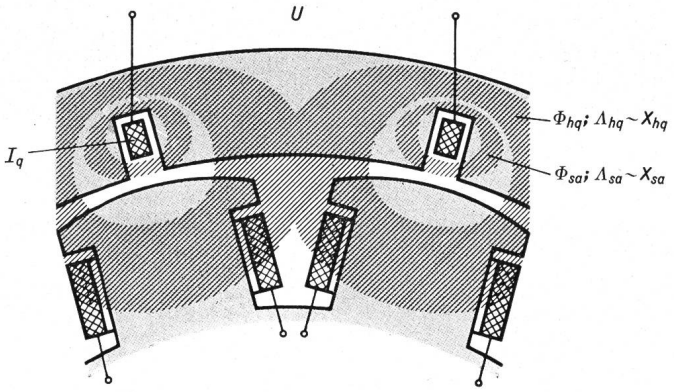

Fig. 5
Transiente Querreaktanz $X_q' = X_q$

Eliminiert man aus den Gl. (13) und (14) den Strom I_f', dann erhält man:

$$U = I_k' \left(X_{sa} + \frac{X_{hd} X_{sf}}{X_{hd} + X_{sf}} \right) \tag{15}$$

Der Vergleich von Gl. (15) mit Gl. (2) zeigt, dass der Klammerausdruck in Gl. (15) die transiente Längsreaktanz X_d' ist.

$$X_d' = X_{sa} + \frac{X_{hd} X_{sf}}{X_{hd} + X_{sf}} \tag{16}$$

Angenähert kann man im Nenner des Bruches die kleine Streureaktanz X_{sf} gegenüber der grossen Hauptreaktanz X_{hd} vernachlässigen und erhält dann vereinfacht:

$$X_d' \approx X_{sa} + X_{sf} \tag{17}$$

Bei der Herleitung dieser Formeln erkennt man einen weiteren Vorteil der Betrachtungsweise als stillstehende Maschine: Die Reaktanzen, die sonst nur flüchtig auftreten, z.B. X_d', sind hier gewissermassen eingefroren, und die Ströme und Flüsse in der Maschine, die zu ihrer Herleitung dienen und zu

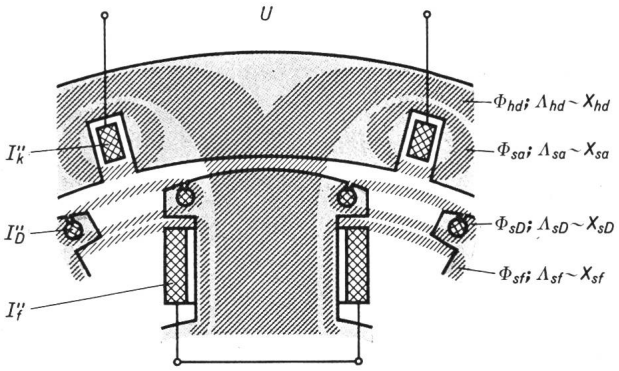

Fig. 6
Subtransiente Längsreaktanz $X_d'' \approx X_{sa} + {}_{sD}$

ihrem Verständnis beitragen, sind nicht dynamisch abklingend, sondern stationär mit Netzfrequenz vorhanden. Sie stehen der Betrachtung und Auswertung beliebig lange zur Verfügung.

10. Transiente Querreaktanz X_q'

Das stillstehend gedachte Polrad wird wieder in die Querlage gedreht, Fig. 5. Diese Figur unterscheidet sich von Fig. 3 nur durch den Kurzschluss der Feldwicklung. Das ist aber in diesem Falle belanglos, denn die Feldwicklung hat in der Querlage keine Flussverkettung mit der Ankerwicklung und kann weder von ihr beeinflusst werden noch auf sie zurückwirken. Dabei ist es gleichgültig, ob die Feldwicklung offen oder kurzgeschlossen ist. Die Strom- und Flussverteilung ist also in Fig. 5 die gleiche wie in Fig. 3. Daher ist die transiente Querreaktanz gleich der synchronen Querreaktanz.

$$X_q' = X_q \tag{18}$$

11. Subtransiente Längsreaktanz X_d''

Die Beschreibung der Maschinenreaktanzen folgt mit steigendem mathematischen Aufwand dem tatsächlichen Vorgang (z. b. dem Abklingvorgang in Fig. 1) entgegen seinem zeitlichen Ablauf, und ist nun an seinem Beginn angelangt. Unmittelbar nach der Zustandsänderung — im subtransienten Zeitabschnitt — beteiligen sich die Feldwicklung und der Dämpfer an den Ausgleichvorgängen. Dementsprechend ist in dem Transformatormodell die Feldwicklung als Sekundärwicklung kurzzuschliessen und der Dämpfer als zweite kurzgeschlossene Sekundärwicklung zu berücksichtigen. Die subtransiente Reaktanz ist also die Reaktanz der stillstehenden Maschine mit kurzgeschlossener Feldwicklung und Dämpfer. Die Längsreaktanz ergibt sich aus der Längslage des Polrades nach Fig. 6.

Der Hauptfluss Φ_{hd} wird von den Strömen I_k'' in der Ankerwicklung, I_f'' in der Feldwicklung und I_D'' im Dämpfer erregt, wobei die beiden letzten dem ersten entgegenwirken:

$$\Phi_{hd} = (I_k'' - I_f'' - I_D'')\, N\Lambda_{hd}$$

Die Streuflüsse Φ_{sa}, Φ_{sf}, Φ_{sD} werden so angenommen, dass sie nur mit der zugehörigen Wicklung allein verkettet sind:

$$\Phi_{sa} = I_k''\, N\Lambda_{sa}$$

$$\Phi_{sf} = I_f''\, N\Lambda_{sf}$$

$$\Phi_{sD} = I_D''\, N\Lambda_{sD}$$

Dann ergeben sich analog zu den Gl. (13) und (14) folgende Gleichungen für die Ankerwicklung am Netz, die kurzgeschlossene Feldwicklung und den Dämpfer:

$$U = (I_k'' - I_f'' - I_D'')\, X_{hd} + I_k''\, X_{sa} \tag{19}$$

$$(I_k'' - I_f'' - I_D'')\, X_{hd} - I_f''\, X_{sf} = 0 \tag{20}$$

$$(I_k'' - I_f'' - I_D'')\, X_{hd} - I_D''\, X_{sD} = 0 \tag{21}$$

Nach Elimination von I_f'' und I_D'' erhält man:

$$U = I_k'' \left(X_{sa} + \frac{X_{hd}\, X_{sf}\, X_{sD}}{X_{hd}\, X_{sf} + X_{hd}\, X_{sD} + X_{sf}\, X_{sD}} \right) \tag{22}$$

und daraus durch Vergleich mit Gl. (1) die subtransiente Längsreaktanz:

$$X_d'' = X_{sa} + \frac{X_{hd}\, X_{sf}\, X_{sD}}{X_{hd}\, X_{sf} + X_{hd}\, X_{sD} + X_{sf}\, X_{sD}} \tag{23}$$

Im Nenner des Bruches ist der letzte Summand als Produkt zweier kleiner Streureaktanzen vernachlässigbar gegenüber den beiden ersten Summanden, in denen die grosse Hauptreaktanz vorkommt. Dann erhält man angenähert:

$$X_d'' \approx X_{sa} + \frac{X_{sf}\, X_{sD}}{X_{sf} + X_{sD}} \tag{24}$$

Vernachlässigt man hier im Nenner X_{sD} gegenüber X_{sf} — was allerdings nur mit Vorbehalt geschehen darf —, dann ergibt sich folgende Näherung, die zwar nicht mehr sehr genau ist, aber wegen ihrer einfachen Anschaulichkeit angeschrieben wird:

$$X_d'' \approx X_{sa} + X_{sD} \tag{25}$$

12. Subtransiente Querreaktanz X_q''

Das Polrad der stillstehenden Maschine mit kurzgeschlossener Feldwicklung und Dämpfer wird in die Querlage gedreht (Fig. 7). Die Feldwicklung ist — wie schon erwähnt — in der Querlage nicht mit der Ankerwicklung verkettet und beteiligt sich trotz ihres Kurzschlusses nicht an den Vorgängen. Der Dämpfer ist dagegen, falls er am ganzen Umfang kurzgeschlossen ist, mit der Ankerwicklung verkettet, und es gelten für die Ankerwicklung am Netz und den Dämpfer in der Querachse folgende Gleichungen ähnlich Gl. (13) und (14):

$$U = (I_q'' - I_Q'')\, X_{hq} + I_q''\, X_{sa} \tag{26}$$

$$(I_q'' - I_Q'')\, X_{hq} - I_Q''\, X_{sQ} = 0 \tag{27}$$

Eliminiert man I_Q'', dann erhält man:

$$U = I_q'' \left(X_{sa} + \frac{X_{hq}\, X_{sQ}}{X_{hq} + X_{sQ}} \right) \tag{28}$$

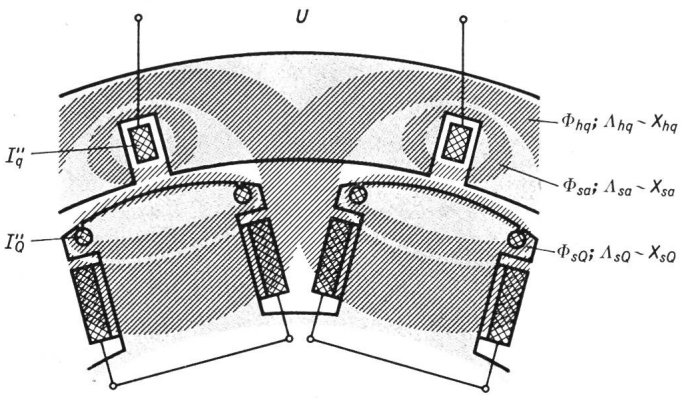

Fig. 7
Subtransiente Querreaktanz $X_q'' \approx X_{sa} + X_{sQ}$

Daraus folgt die subtransiente Querreaktanz:

$$X_q'' = X_{sa} + \frac{X_{hq}\, X_{sQ}}{X_{hq} + X_{sQ}} \tag{29}$$

oder bei Vernachlässigung von X_{sQ} gegenüber X_{hq} im Nenner des Bruches angenähert:

$$X_q'' \approx X_{sa} + X_{sQ} \tag{30}$$

13. Relative Reaktanzen

Die absoluten Werte der Maschinenreaktanzen X in Ω liegen je nach Leistung der Maschine in einem sehr weiten Bereich. Bezieht man jedoch diese Reaktanzen auf die Nennimpedanz der Maschine (Nennspannung je Strang durch Nennstrom), dann liegen die so erhaltenen relativen Reaktanzen x als dimensionslose Grössen (oder Prozentwerte) in verhältnismässig engen Grenzen. Mittlere Zahlenwerte sind in Tabelle I eingetragen.

Mittlere Zahlenwerte der relativen Reaktanzen von Synchronmaschinen

Tabelle I

			Turbo-generatoren	Schenkelpol-maschinen		
				mit Dämpfer	ohne Dämpfer	mit Polgitter
1	Synchrone Längsreaktanz	$x_d = x_{hd} + x_{sa}$	1,7	1,0	1,0	1,0
2	Synchrone Querreaktanz	$x_q = x_{hq} + x_{sa}$	1,6	0,6	0,6	0,6
3	Transiente Längsreaktanz	$x_d' \approx x_{sa} + x_{sf}$	0,3	0,3	0,3	0,3
4	Transiente Querreaktanz	$x_q' = x_q$	1,6	0,6	0,6	0,6
5	Subtransiente Längsreaktanz	$x_d'' \approx x_{sa} + x_{sD}$	0,2	0,2	0,3	0,2
6	Subtransiente Querreaktanz	$x_q'' \approx x_{sa} + x_{sQ}$	0,2	0,2	0,6	0,6

13.1 Erläuterung der relativen Reaktanzen anhand der magnetischen Leitwerte

Es soll nun gezeigt werden, wie die Reaktanzwerte in Tabelle I mit Hilfe der magnetischen Leitwerte zu erklären sind.

Zu Zeile 1: Turbogeneratoren haben x_d-Werte etwa zwischen 1,0 und 2,5; Mittelwert 1,7. Schenkelpolmaschinen haben x_d-Werte etwa zwischen 0,6 und 1,4; Mittelwert 1,0. Die höheren x_d-Werte der Turbogeneratoren hängen mit der anderen Bauart und der höheren Ausnutzung zusammen. Die vorliegende Aufgabe besteht nicht darin, die Zahlenwerte der Reaktanzen selbst zu berechnen, sondern nur ihre gegenseitigen Grössenverhältnisse anhand der magnetischen Leitwerte zu erläutern. Dabei dienen die x_d-Werte in Zeile 1 von Tabelle I als Vergleichsgrundlage für die folgenden Reaktanzen.

Zu Zeile 2: Turbogeneratoren mit Volltrommelläufer haben in der Querachse nahezu denselben magnetischen Leitwert wie in der Längsachse. Daher ist $x_{hq} \approx x_{hd}$ und $x_q \approx x_d$. Der kleine Unterschied der Tabellenwerte zwischen $x_d = 1{,}7$ und $x_q = 1{,}6$ rührt daher, dass der Induktor in der Querachse die Erregernuten, in der Längsachse keine Nuten hat. Bei Schenkelpolmaschinen ist dagegen in der Pollücke (Fig. 3) viel mehr Luft als unter dem Pol (Fig. 2); daher ist hier mit deutlicherem Unterschied $\Lambda_{hq} < \Lambda_{hd}$, also $x_{hq} < x_{hd}$ und $x_q < x_d$.

Zu Zeile 3: $x_d' \approx x_{sa} + x_{sf}$ unterscheidet sich von $x_d = x_{hd} + x_{sa}$ durch x_{sf} anstelle x_{hd}. Da $\Lambda_{sf} \ll \Lambda_{hd}$ (Fig. 4), ist auch $x_{sf} \ll x_{hd}$ und daher $x_d' \ll x_d$.

Zu Zeile 4: Nach Gl. (18) ist $x_q' = x_q$. (Fig. 5 hat dieselben magnetischen Flüsse und Leitwerte wie Fig. 3). Daher stehen in der vierten Zeile dieselben Werte wie in der zweiten.

Zu Zeile 5: $x_d'' \approx x_{sa} + x_{sD}$ unterscheidet sich von $x_d' \approx x_{sa} + x_{sf}$ durch x_{sD} anstelle x_{sf}. Da $\Lambda_{sD} < \Lambda_{sf}$ (Fig. 6), ist auch $x_{sD} < x_{sf}$ und daher $x_d'' < x_d'$. Das gilt für alle Maschinentypen mit Ausnahme der Schenkelpolmaschine ohne Dämpfer. Hier ist die subtransiente Reaktanz x_d'' praktisch gleich der transienten Reaktanz x_d' und daher der Wert in der fünften Zeile gleich dem in der dritten Zeile.

Zu Zeile 6: Bei Turbogeneratoren (deren Nutenverschlusskeile wie Dämpferstäbe wirken) und bei Schenkelpolmaschinen mit Dämpfer verläuft der Dämpferquerstreufluss Φ_{sQ} nach Fig. 7 quer durch den Pol und hat hier scheinbar einen ganz guten Eisenpfad zur Verfügung. Tatsächlich ist aber wegen der starken Flusseinengung und der Überbrückung der Dämpfernutschlitze (auch bei den nicht eingezeichneten Dämpferstäben) der Leitwert Λ_{sQ} nach Fig. 7 kaum ausschlaggebend verschieden von dem Leitwert Λ_{sD} nach Fig. 6. Ausschlaggebend schon deshalb nicht, weil die zugehörigen Dämpferstreureaktanzen x_{sQ} und x_{sD} gegenüber der grösseren Ankerstreureaktanz x_{sa} in der Summe eine verhältnismässig geringe Rolle spielen, so dass $x_q'' \approx x_d''$ ist.

Bei Schenkelpolmaschinen ohne Dämpfer und mit Polgitter (kein Dämpfer in der Pollücke) ist die subtransiente Querreaktanz x_q'' annähernd gleich der transienten Querreaktanz x_q', und da diese wiederum gleich der synchronen Querreaktanz x_q ist, sind für die letztgenannten beiden Maschinentypen die Werte in der sechsten Zeile gleich denen in der vierten und zweiten Zeile.

Adresse des Autors:
Dr. *R. Gärtner*, Ingenieur der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Hohenzollerndamm 150, D-1 Berlin 33.

L'équipement électrique de la centrale de Veytaux

Par *F. Vesligaj*, Lausanne

621.311.21 (494.451)

Dans cet article, l'auteur se borne à décrire l'équipement électrique de la centrale de Veytaux des Forces Motrices de l'Hongrin-Léman. Il s'agit en effet d'une installation de 240 MW équipée de 4 groupes ternaires. Les études ont notamment porté l'accent sur la réduction des pertes, sur la possibilité de passer rapidement d'un régime à l'autre et sur la sécurité d'exploitation. On a été conduit à l'adoption d'un automatisme très poussé, de conception moderne, complété par une installation de traitement d'information. L'article se termine sur une description de certaines particularités des services internes de la centrale.

Der Autor beschreibt den elektrischen Teil des Pumpspeicherwerkes Veytaux der Forces Motrices de l'Hongrin-Léman. Es handelt sich um eine Anlage von 240 MW mit 4 hydraulisch getrennten Maschinengruppen. Bei den Studien wurde grosser Wert auf die Verminderung der Verluste, den schnellen Übergang von einem Betriebszustand zum andern sowie auf die Betriebssicherheit gelegt. Die vollautomatische Steuerung der Anlage ist nach modernsten Prinzipien ausgeführt und durch eine Datenverarbeitungsanlage ergänzt. Am Ende des Artikels sind einige Einzelheiten der Eigenbedarfanlage angegeben.