

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 11 (1920)
Heft: 9

Artikel: Graphische Ermittlung der Spannungsverhältnisse in sterngeschalteten Drehstromwiderständen
Autor: Hugentobler, O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056303>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

Zum Beispiel No. 1, das der Fig. 2 ohne weiteres entspricht, bemerken wir, dass die durch abwechselnden Antrieb mit zwei ungleichen Motoren (ein 12-poliger und ein 8-poliger Drehstrom-Motor) ursprünglich ausgelöste Störung durch Umbau mit Verwendung ausschliesslich gleicher Motoren beseitigt wurde.

Zum Beispiel No. 2, das, abgesehen von der Lage der Blindwellen, unserer Fig. 3 entspricht, bemerken wir, dass sich v_k durch keine eigentliche Störung, sondern nur durch eine leichte Lärmerzeugung des Getriebes bemerkbar macht.

Für das Beispiel No. 3 kann wieder Fig. 2 als grundlegend hingestellt werden. Indessen sind die Motoren nicht direkt auf den obern Kurbelwellen aufgebaut, sondern arbeiten mittels Zahnräder auf dieselben; die auf den Kurbelkreis zu beziehende Masse des Rotors war daher mit dem Quadrat des, als Zahl > 1 verstandenen, Uebersetzungsverhältnisses zu multiplizieren, um m zu erhalten, während die in γ enthaltenen Teilelastizitäten, soweit sie die Motorwelle betreffen, vorerst durch das Quadrat des Uebersetzungsverhältnisses dividiert werden mussten¹⁾. Die ursprünglich sehr gefährlichen Störungen der kritischen Geschwindigkeit v_k sind durch Einbau von Federungen in die grossen Zahnräder, d. h. durch starke Vergrösserung von γ und gleichzeitige starke Verkleinerung von v_e und von v_e völlig beseitigt worden.

Das Beispiel No. 4 entspricht grundsätzlich wieder der Fig. 3, sofern man sich die zwei Motoren dieser Figur in einen einzigen verschmolzen denkt, von dessen Kurbeln aus die schrägen Stangen dann auf Blindwellen entsprechend weitergehen, wie in Fig. 3. Dem v_k entspricht keine eigentliche, wenigstens keine den Betrieb hindernde Störung.

Geradeso wie es die Entwicklung des Baues grosser elektrischer Generatoren und zugehöriger Turbo-Antriebsmaschinen (sowohl Wasserturbinen als Dampfturbinen) erforderlich machte, dass sich bei der Feststellung der Dimensionen der Maschinenwellen der Konstrukteur über die Möglichkeit des Entstehens und der Verhinderung kritischer Drehzahlen durch Vorausberechnung Klarheit verschafft, so dürfte in Zukunft beim Bau grosser Lokomotiven mit Parallelkurbelgetrieben der Konstrukteur ebenfalls die Möglichkeit des Entstehens und der Verhinderung kritischer Drehzahlen durch Vorausberechnung untersuchen müssen. Der Verfasser ist sich durchaus klar, dass diesbezügliche Forschungsarbeiten noch weiteres Material zum vorliegenden Problem beibringen werden, obwohl es auf Grund unserer Darlegungen im Wesentlichen als gelöst betrachtet werden kann.

Graphische Ermittlung der Spannungsverhältnisse in sterngeschalteten Drehstromwiderständen.

Von O. Hugentobler, Wädenswil.

Im Bulletin No. 11 des letzten Jahrganges hat Herr W. Schälchlin eine rechnerische Methode zur Ermittlung der Stromverhältnisse an sterngeschalteten Drehstromwiderständen ohne Nulleiter entwickelt. Es wurde gezeigt, dass bei ungleichen Widerständen in Sternschaltung eine sehr wesentliche Unsymmetrie der Phasenspannungen auftreten kann, ja, dass sogar der Transformator eine Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Phasenspannung aufweisen wird. Früher, wo sterngeschaltete Widerstände fast ausschliesslich bei Motoren und Transformatoren angewendet wurden und schon bei der Fabrikation dieser Apparate auf genau symmetrische Belastung ein Hauptaugenmerk gerichtet war, kamen wesentliche Ungleichheiten in der Belastung der drei Phasen selten vor. Heute aber, wo bereits sehr viele grössere und ganz grosse Wärmeapparate an Drehstromnetze angeschlossen sind (Wärmespeicheröfen, Heisswasserboiler, Grossbacköfen usw.) rechtfertigt es sich wohl, die Belastungsverhältnisse zu studieren, wenn der Anschluss an die drei Phasen nicht sym-

¹⁾ Es ist m stets eine sog. „reduzierte“ Masse und ist γ stets ein sog. „reduzierter“ Nachgiebigkeitsgrad, beide Grössen bezogen auf den Kurbelkreis.

metrisch erfolgt. Die Schaltung der Teilwiderstände im Stern wird an solchen Objekten überall da angewendet, wo nur höhere Netzspannungen zur Verfügung stehen, oder wo eine starke Unterteilung des Gesamt-Energiebedarfes in einzelne Heizelemente von geringerer Leistung geboten ist, da sich bei Dreieckschaltung der Phasen oft sehr kleine Querschnitte ergeben.

Natürlich wird man stets eine möglichst gleichmässige Verteilung der Widerstände auf die drei Phasen anstreben und in neuem Zustande eine praktisch gleichmässige Verteilung auch erreichen. Da aber naturgemäss die Querschnitte der Widerstandsdrähte im Vergleich zu den Wicklungen an Motoren und Transformatoren eine sehr hohe Strombelastung aufweisen, ist die Gefahr des Durchbrennens einzelner Elemente bedeutend grösser als bei diesen. So wird es verhältnismässig oft vorkommen, dass die Belastungswiderstände der einzelnen Phasen ungleich werden. Tritt dieser Fall aber ein, so werden nicht nur die einzelnen Phasen des Transformators ungleich belastet und damit seine volle Ausnützung beeinträchtigt, sondern es können infolge erhöhter Spannung auch die noch intakt gebliebenen Elemente *derselben* Phase ebenfalls durchbrennen.

Ein einfaches Beispiel mag diese Tatsache erläutern:

Ein elektrisch beheizter Durchlaufapparat besitze 12 Elemente, die in drei Gruppen zu je vier Elementen in Sternschaltung an die drei Phasen eines Drehstromnetzes von 500 Volt verketteter Spannung angeschlossen sind.

Der Apparat sei für eine Leistung von 12 kW gebaut, jedes Element nimmt also 1 kW bei 290 Volt Phasenspannung und 3,45 A auf, und besitzt einen Widerstand von 84 Ohm. Der Gesamtwiderstand einer Gruppe beträgt also 21 Ohm und der Strom in

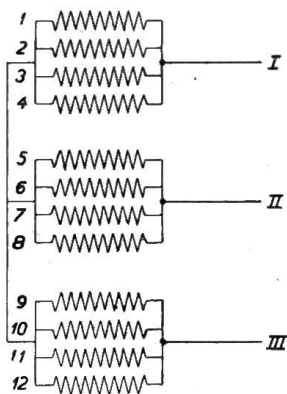


Fig. 1.

jeder Phase 13,8 Amp. Brennt nun aus irgend einem Grunde das Element 1 durch, so erhöht sich plötzlich der Widerstand der Gruppe I auf 28 Ohm, während derjenige von Gruppe II und III immer noch 21 Ohm beträgt; wir haben also eine ungleichmässige Belastung. Die Phasenspannung an den drei Gruppen wird nicht mehr 290 Volt sein, sondern in Gruppe I wird sie dem höheren Gesamtwiderstand entsprechend höher und in Gruppe II und III entsprechend niedriger sein als 290 Volt. Diese erhöhte Spannung in Gruppe I bewirkt nun eine grössere Stromstärke in den Elementen 2, 3 und 4; diese letzteren werden also überlastet, wobei eines derselben eventuell ebenfalls durchbrennt und die ungleichmässige Belastung, und damit auch die Spannung der Gruppe I weiter gesteigert wird. So kann das Spiel weiter gehen bis schliesslich alle vier Elemente der Gruppe I unterbrochen sind und der Apparat nur noch an einer Phase des Drehstromnetzes angeschlossen ist, wobei die Gruppen II und III

hintereinander geschaltet sind. Dabei nimmt der Apparat die Hälfte seiner früheren Leistung auf, und wird infolgedessen oft unbrauchbar sein.

Die von Herrn Schälchlin angegebene Methode zur Berechnung der Stromverhältnisse ist zweifellos richtig, sie hat jedoch verschiedene Nachteile. Wenn auch keine sehr komplizierten Rechnungen zu machen sind, so ist doch die Berechnung ziemlich umständlich. Die vielen zu ermittelnden Einzelströme, die genaue Beobachtung der Vorzeichen und die nachherige Berechnung der Resultierenden aus Komponenten von der Phase 0, 90 und 180⁰ schliesst doch erhebliche Fehlermöglichkeiten in sich, die leicht zu einem fehlerhaften Endresultat führen können. Dabei ist zu bemerken, dass ein Rechnen mit dem Rechenschieber gewöhnlich nicht genügt, und dass mindestens fünfstellige Logarithmen benutzt werden sollten. Den Beweis für diese Behauptung liefert das in erwähntem „Bulletin“ angeführte Rechnungsbeispiel selbst. Während (wahrscheinlich mit dem Rechenschieber) gefunden worden sind: $I_1 = 1,84 \text{ A}$; $I_2 = 3,38 \text{ A}$; $I_3 = 3,61 \text{ A}$ ergibt eine genauere Berechnung mit fünfstelligen Logarithmen: $J_1 = 1,81 \text{ A}$; $J_2 = 3,38 \text{ A}$; $J_3 = 3,44 \text{ A}$; wobei in der Berechnung von J_3 allerdings noch ein anderer Fehler vorhanden ist, indem J_3 unrichtig eingesetzt wurde, ein weiterer Beweis, dass bei den vielen Teilströmen Fehler leicht möglich sind.

Es gibt nun eine graphische Methode, mittels welcher die Belastungsverhältnisse bedeutend einfacher sowohl am Stromverbraucher wie auch am Transformator bestimmt werden können. Man ermittelt dabei zweckmässigerweise die Phasenspannungen, währenddem Herr Schälchlin die Phasenströme bestimmt. Da bei elektrischen Wärmeapparaten fast ausschliesslich *Induktions- und kapazitätsfreie Belastungen* vorkommen, werden im Folgenden nur solche Fälle betrachtet, obwohl eine allgemeine Behandlung in ähnlicher Weise möglich ist. Wir lassen dabei nacheinander einen der drei sterngeschalteten Widerstände zuerst unendlich gross und darauf null werden. Fig. 2 zeigt ein Dreiphasensystem mit den verketteten Spannungen E_{12} , E_{23} und E_{31} . An dieses sind die induktionsfreien Widerstände R_1 , R_2 und R_3 in Stern angeschlossen. Lassen wir nun R_1 unendlich gross

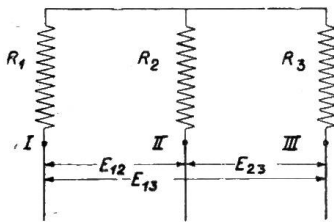


Fig. 2.

werden, d. h. unterbrechen wir die Phase I, so wirkt die Spannung E_{23} auf die hintereinandergeschalteten Widerstände R_2 und R_3 . Der Strom J_{23} in diesen Widerständen ist $J_{23} = \frac{E_{23}}{R_2 + R_3}$. Die Spannung E_{23} wird am Verbindungspunkt $R_2 R_3$ der Widerstände (ehemaliger Stern- oder Nullpunkt) in zwei Teile E_{23}'' und E_{23}''' geteilt, die sich wie die Widerstände R_2 und R_3 verhalten. Die Teilung der Spannung E_{23} kann also nach Fig. 3

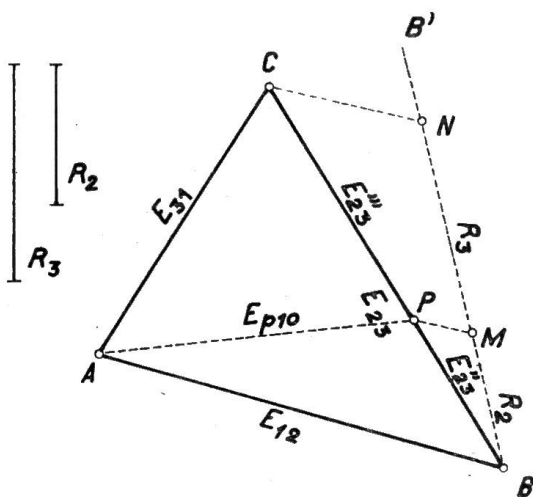


Fig. 3.

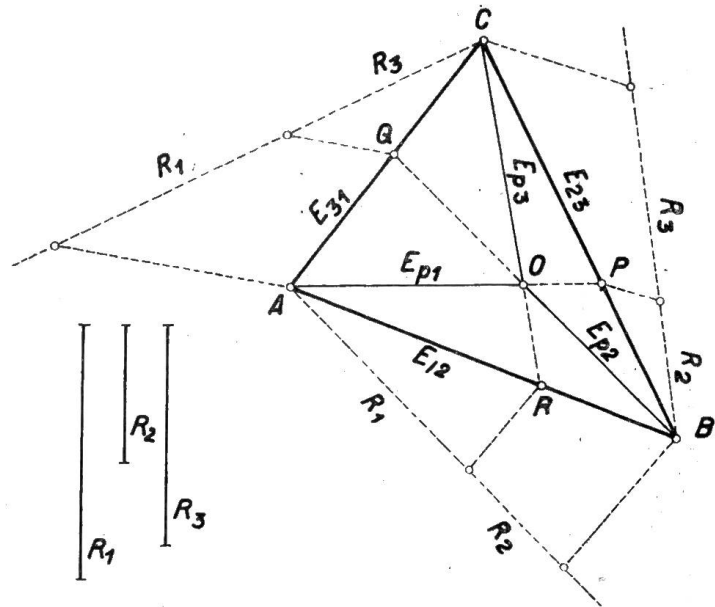


Fig. 4.

so ausgeführt werden, dass auf dem beliebig gewählten Strahl BB' durch den einen Endpunkt B der Spannung E_{23} die Widerstände $R_2 = BM$ und $R_3 = MN$ abgetragen werden. Die Parallele MP zu NC teilt die Spannung E_{23} im Verhältnis von R_2 zu R_3 . Die Strecke PA vom Teilpunkt P zum dritten Eckpunkt des Dreiecks ist nach Grösse und Richtung die Spannung zwischen dem Nullpunkt und der dritten Phase. Damit wären die Spannungsverhältnisse für den Fall, dass die Phase I unterbrochen ist, festgelegt: Die Phasenspannungen sind E_{23}'' , E_{23}''' und E_{p10} ; der Nullpunkt P liegt auf der Dreiecksseite E_{23} .

Lassen wir nun R_1 anstatt unendlich gross, null werden, so kommt der Nullpunkt in den Eckpunkt A des Dreiecks zu liegen. Wir erkennen nun leicht, dass der Nullpunkt bei Aenderung von R_1 von ∞ bis Null den Weg von P bis A zurücklegt; für irgend einen endlichen positiven Wert des Widerstandes R_1 muss also der Nullpunkt auf der Strecke PA liegen. Lassen wir auf gleiche Weise R_2 unendlich gross werden, so erhalten wir als Nullpunkt den Punkt Q (Fig. 4). Aendert sich R_2 vom Wert ∞ bis Null, so beschreibt der Nullpunkt den Weg QB . Für irgend einen positiven endlichen Wert von R_2 liegt der Null-

punkt des Systems also auf der Geraden QB . Wird endlich die Phase III unterbrochen, so erhalten wir als Nullpunkt den Punkt R und die Strecke RC bezeichnet den Weg desselben, wenn R_3 vom Wert ∞ bis Null abnimmt. Die drei Geraden PA , QB und RC

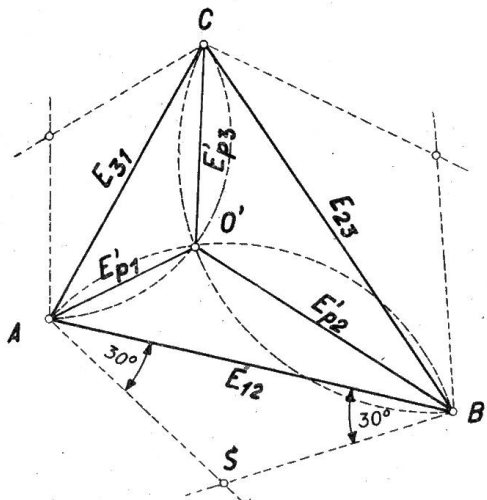


Fig. 5.

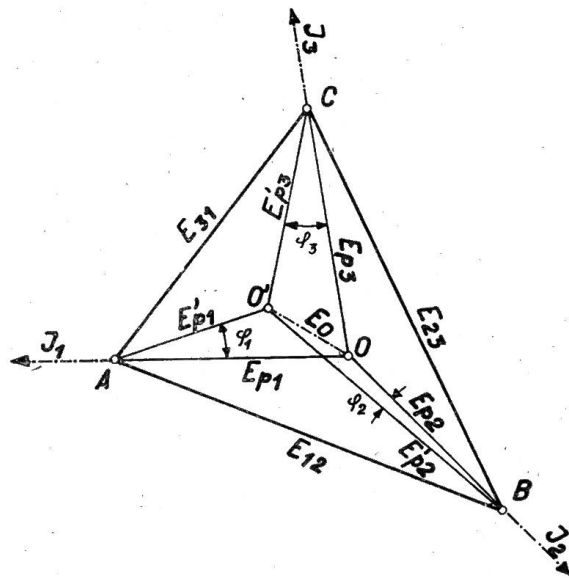


Fig. 6.

schneiden sich in einem Punkt, und dies ist der Nullpunkt für den Fall, dass keine der Phasen I, II oder III unterbrochen ist, also für den allgemeinen Belastungsfall nach Fig. 2. Die Strecken $OA = E_{P1}$; $OB = E_{P2}$ und $OC = E_{P3}$ sind nach Grösse und Richtung die Phasenspannungen des Systems. Aus diesen Spannungen lassen sich die Ströme in den Widerständen ohne weiteres berechnen. Es ist:

$$J_1 = \frac{E_{P1}}{R_1}; \quad J_2 = \frac{E_{P2}}{R_2}; \quad J_3 = \frac{E_{P3}}{R_3}.$$

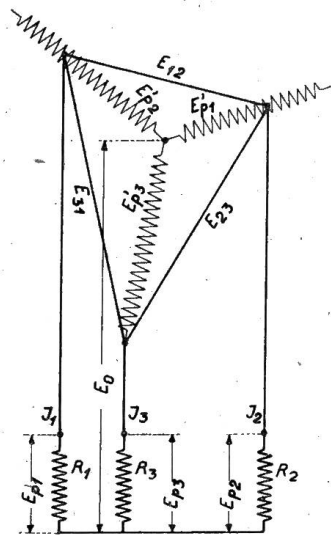


Fig. 7.

Damit wären die Spannungs- und Stromverhältnisse an den Widerständen ermittelt. Eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Phasenspannung besteht bei induktionsfreier Belastung nicht. Anders verhält es sich jedoch am sterngeschalteten Transformator, an den diese Widerstände angeschlossen sind. Die verketteten Spannungen und die Ströme bleiben natürlich in Grösse und Richtung dieselben, die Phasenspannungen jedoch sind gegeneinander um 120° versetzt. Zur Ermittlung derselben trage man z. B. an die Strecke AB (Fig. 5) in jedem Endpunkt einen Winkel von 30° auf. Die beiden Schenkel schneiden sich in S . Von diesem Punkt als Zentrum aus schlage man einen Kreisbogen durch die Punkte A und B . Analog verfähre man bei den Strecken BC und AC . Die drei Kreisbogen schneiden sich in einem Punkt O' , dem Nullpunkte der Phasenspannungen E'_{P1} , E'_{P2} und E'_{P3} des Transformators. Da die Spannungen $O'A$, $O'B$ und $O'C$ Peripheriewinkel über den Bogen von Zentriwinkeln von 240° sind, sind die ersteren tatsächlich um 120° gegeneinander verschoben.

Werden die Phasenspannungen an Transformator- und Belastungswiderständen zusammen in das Dreieck ABC eingezeichnet, so sind alle Strom- und Spannungsverhältnisse des ganzen Systems daraus ersichtlich (Fig. 6). Da die Ströme J_1 , J_2 und J_3 mit den Spannungen E_{P1} , E_{P2} und E_{P3} in Phase sind, so ergeben sich die Phasenverschiebungswinkel φ_1 , φ_2 und φ_3 zwischen Stromstärke und Phasenspannung am Transformator ohne weiteres als die Winkel zwischen E_{P1} und E'_{P1} ; E_{P2} und E'_{P2} ; E_{P3} und E'_{P3} . Die Strecke $OO' = E_0$

ist die Spannung zwischen dem Nullpunkt des Transformators und demjenigen der Widerstände, sofern der erstere in Stern geschaltet ist. Genau genommen müsste eigentlich als R_1 die Summe aller ohmschen Widerstände der Phase I zwischen dem Nullpunkt der Belastungsanordnung und demjenigen des Transformators eingesetzt und analog für R_2 und R_3 verfahren werden. Da aber der ohmsche Widerstand der Transformatorwicklung und der Zuleitungen gegenüber den Belastungswiderständen meist sehr klein sein wird, kann er gewöhnlich vernachlässigt werden.

Ein Versuchsbeispiel möge die praktische Anwendung der vorstehenden Darlegungen weiter beleuchten: An einem sterngeschalteten Stufentransformator waren die ebenfalls sterngeschalteten induktionsfreien Widerstände $R_1 = 49,5 \Omega$, $R_2 = 99 \Omega$ und $R_3 = 148 \Omega$ nach dem Schema der Fig. 7 angeschlossen. Die verketteten Spannungen wurden gemessen zu: $E_{12} = 232$ Volt, $E_{23} = 295$ Volt, $E_{31} = 328$ Volt. Es sollen die übrigen Spannungs- und Stromwerte ermittelt werden. In Fig. 8 können alle Spannungen ohne weiteres abgemessen werden. Sie sind in Tabelle I in die Kolonne „berechnet“ eingetragen. Die Stromstärken J_1 , J_2 und J_3 ergeben sich zu:

$$J_1 = \frac{E_{P1}}{R_1} = \frac{106,5}{49,5} = 2,15 \text{ A}$$

$$J_2 = \frac{E_{P2}}{R_2} = \frac{149}{99} = 1,51 \text{ A}$$

$$J_3 = \frac{E_{P3}}{R_3} = \frac{214}{148} = 1,45 \text{ A}$$

Die graphisch berechneten und die durch Versuch ermittelten Werte sind in genannter Tabelle zusammengestellt und die prozentuale Abweichung angegeben. Die darin enthaltene Leistung L des Systems wurde nach der Zweiwattmetermethode gemessen und aus der Beziehung $J_1^2 r_1 + J_2^2 r_2 + J_3^2 r_3$ berechnet. Wie man sieht, stimmen die Werte ziemlich gut überein. Die Hauptursache der Differenzen ist wohl darin zu suchen, dass die Spannung am Transformator während der Dauer der Versuche nicht ganz konstant gehalten werden konnte, zum Teil erklären sie sich auch aus Ablesungs- und Instrumentenfehler.

Für den speziellen Fall, dass die verketteten Spannungen am Transformator gleich gross sind, was meistens zutreffen dürfte, vereinfacht sich auch die graphische Lösung dementsprechend.

Ein grosser Vorteil der hier beschriebenen graphischen Methode gegenüber der rechnerischen besteht neben ihrer Einfachheit darin, dass Fehler beim Eintragen von Vektoren, Widerstandswerten oder Winkeln in das Diagramm sich sofort dadurch zeigen müssen, dass

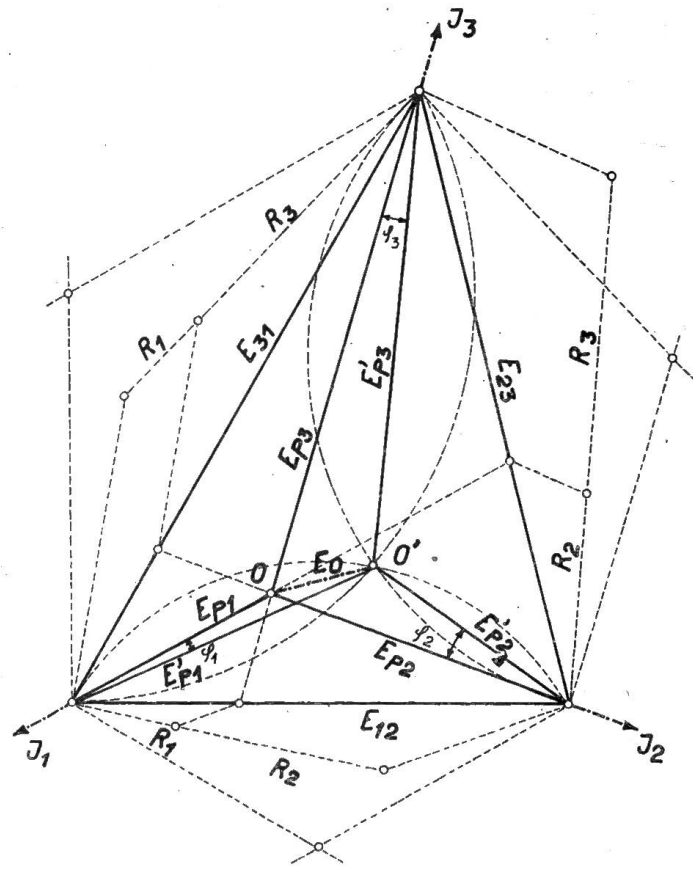


Fig. 8.

Vergleich der gemessenen und berechneten Grössen.

Tabelle I

Grösse	Masseinheit	gemessen	berechnet	Abwechg. %
E_{12}	Volt	232	—	—
E_{23}	"	295	—	—
E_{31}	"	328	—	—
E_{P1}	"	106,5	106,5	0
E_{P2}	"	151	149	+ 1,3
E_{P3}	"	244	244	0
E'_{P1}	"	156	154,5	+ 1,0
E'_{P2}	"	111	113	— 1,8
E'_{P3}	"	220	223	— 1,3
E_0	"	48	49	+ 2
R_1	Ohm	49,5	—	—
R_2	"	99	—	—
R_3	"	148	—	—
J_1	Ampere	2,18	2,15	+ 1,4
J_2	"	1,54	1,51	+ 2,0
J_3	"	1,66	1,65	+ 0,6
L	Watt	832,8	857	— 2,8

beispielsweise die drei Phasenspannungen, oder auch die Kreisbogen nach Fig. 5 sich nicht in einem Punkte schneiden. Zur Kontrolle wird man deshalb bei der Ermittlung der Nullpunkte stets auch die dritte Gerade beziehungsweise den dritten Kreisbogen einzeichnen, obwohl das Eintragen derselben nicht absolut notwendig ist.

Um nochmals auf die eingangs erwähnte Tatsache zurückzukommen, wonach unter Umständen alle Elemente einer Phase durchbrennen können, wenn vorerst nur eines defekt ist, so gibt es zur Verhütung zwei Mittel. Das sicherste ist natürlich stets den Nulleiter des Transformators zum Nullpunkt an den Widerständen zu ziehen. Ist dies nicht möglich, so empfiehlt es sich, je drei Elemente für sich in Stern zu schalten und mit eigenem Nullpunkt zu versehen. Es entstehen dann so viele Nullpunkte als die Gesamtzahl der Elemente durch drei teilbar ist, welche Anordnung vielleicht bei der Erstaussführung etwas teurer ist, sich aber trotzdem lohnt, da allfällige Reparaturkosten bedeutend geringer ausfallen.

Diese Anordnung schliesst natürlich eine zeitweise ungleichmässige Belastung

des Transformators nicht aus, wenn Elemente defekt werden sollten; die Differenzen werden aber bedeutend geringer sein, so dass sie bei grösseren Apparaten praktisch kaum in Betracht fallen können.

Miscellanea.

Inbetriebsetzung von schweizerischen Starkstromanlagen. (Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des S. E. V.) Im August 1920 sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

Zentralen.

Fabrique d'Horlogerie de Fontainemelon, Corgémont. Centrale électrique dans la fabrique à Corgémont, courant triphasé, 3150 volts, 50 périodes, 115 kVA.

M. Bundi, Elektrizitätswerk, Curaglia (Graubünden). Maschinenstation für Beleuchtung der Hotels und Stromlieferung an Dritte, Gleichstrom, 140 Volt, 11 PS.

Hochspannungsfreileitungen.

Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau. Leitung zur Transformatorstation beim Schloss Bellikon, Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

Nordostschweizerische Kraftwerke A.-G., Baden. Leitung Affoltern a. A. nach Thalwil, Drehstrom, 45000 Volt, 50 Perioden.

Flurgenossenschaft des Belp- und Kehrsatzmooses, Belp (Bern). Leitung zur Transformatorstation des Pumpwerkes Belpmoos bei Kehrsatz, Drehstrom, 16000 Volt, 40 Perioden.

Elektra Diegten-Bennwil, Bennwil (Baselland). Leitung zur Transformatorstation.

Elektrizitätswerk Bischofszell, Bischofszell. Leitung zur Transformatorstation Hackborn bei Bischofszell, Drehstrom, 5000 Volt, 50 Perioden.

Società Elettrica delle Tre Valli, Bodio. Linea ad alta tensione alla Stazione trasformatrice di Iragna, corrente trifase, 8000 volt, 50 per.

Société électrique de la Côte, Gland. Ligne à haute tension pour les Grâces (Beguins), courant monophasé, 4400 volts, 50 périodes.

Elektra Baselland, Liestal. Leitung zur Transformatorstation „Oristhal“ (Gemeinde Liestal), Drehstrom, 6400 Volt, 50 Perioden.

Elektrizitätswerk der Stadt Luzern, Luzern. Leitung zur Transformatorstation II in Buochs, Drehstrom, 5300 Volt, 50 Perioden.