

nach Art der Fig. 13, sondern ihre Abweichung von einer Umlaufspannung nach Art der Fig. 14 zu messen.

Der magnetische Spannungsmesser ermöglicht aber auch die Bestimmung der magnetischen Spannung (aufgewandten Amperewindungen) für irgend einen Teil des magnetischen Kreises einer elektrischen Maschine. Mag es sich nun um das Joch, die Magnet-schenkel, den Luftspalt, die Zähne oder den Anker handeln. Auch nach dieser Richtung hin sollen in der Reichsanstalt Versuche angestellt werden.

Bei Verwendung von Wechselstrom dürfte sich der magnetische Spannungsmesser in Verbindung mit dem Oszillographen, Vibrationsgalvanometer und dem Quadranten-elektrometer ein weites Anwendungsgebiet erörtern. Schließlich eignet er sich auch für den Unterricht zur Demonstration der Eigenschaften des Linienintegrals eines Vektors.

Sicherheits- und Empfindlichkeitsfaktor des Leitungsschutzsystems von Merz und Price.

Von

Karl Kuhlmann, Berlin-Pankow.

(Fortsetzung aus Heft 3, S. 124.)

5. **Untersuchung der Schaltung II.** Fig. 2, 9, 10, 11, 12, 13. Wir behandeln nunmehr die Schaltung II und hierbei besonders den Einfluß des Parallelwiderstandes zu den primären Stromwandlerklemmen. Herr Price, der Erfinder des Differential-schutzsystems, hatte, wie erwähnt, dies Mittel ursprünglich vorgesehen, um den Verlauf der sekundären Klemmenspannung als Funktion der Primärstromstärke geradlinig zu gestalten. Wie wir aber oben gesehen haben, ist eine Sättigung der Strom-wandler in geringen Grenzen wohl zulässig. Der Parallelwiderstand hat aber andere, ganz wesentliche günstige Veränderungen in dem Verhalten des Schutzsystems zur Folge. Diese sind:

1. Ein sehr großer Teil des Hauptstromes geht bei fehlerfreier Hauptleitung durch den Widerstand, da die resultierende Impedanz des Stromwandlers wegen der Gegenschaltung der sekundären Wicklungen sehr groß ist. Höhere Harmonische gehen daher nur zum Teil in den Stromwandler bzw. den Relais- oder Hilfskreis. Der Parallelwiderstand wirkt gewissermaßen reinigend auf die Stromkurve ein, die in den Hilfskreis transformiert wird.

2. Im Falle eines Fehlers am Hauptkabel und einseitiger Speisung des Fehlers bietet der zweite Stromwandler ein und derselben Phasenleitung dem Relaisstrom eine sehr geringe Impedanz dar, da der Stromwandler an den Gegen- oder Hochspannungsklemmen kurz geschlossen ist. Es reicht somit auch ein kleiner Fehlerstrom im treibenden Strom-wandler aus. Im Falle eines Fehlers geht wegen des kleiner gewordenen Hilfskreiswiderstandes mehr Strom durch den Stromwandler als im normalen Betriebe, so daß der Strom-verlust durch den Widerstand ausgeglichen wird; der Widerstand drückt also die Empfind-lichkeit kaum herab.

3. Der Widerstand hält den Stromwandler selbst bei kleinen Eisenquerschnitten im normalen Betriebe auf geringer Sättigung, so daß die Kurve der Spannung an den Se-kundärklemmen nicht oder kaum verzerrt wird.

4. Die sekundäre Stromwandlerspannung ist in erster Linie abhängig von dem Win-dungsverhältnis und dem Spannungsabfall im Widerstande und fast unabhängig von der Höherer Frequenz des das Hauptkabel durchfließenden Stromes. Denken wir uns in der Haupt-leitung einen sinusförmigen Strom von konstanter Intensität fließen und die Frequenz immer mehr erhöht, so bleibt die Sekundärspannung fast konstant. Diese sinkt ferner mit wachsendem s_1 .

Fig. 9 bezieht sich auf einen Kabelschutzstromwandler, wie er nach den Angaben des Verfassers für das Differentialschutzsystem vor Einführung sogenannter Universalstromwandler für Leitungslängen bis 12,0 km verwendet worden ist. Die elektrischen Daten sowie die Kurven sind für diese Arbeit von der AEG. freundlichst zur Verfügung gestellt worden. Die Primärwindungszahl dieses Stromwandlers war $s_1 = 6$, der Widerstand 0,00036. Die sekundäre Windungszahl betrug $s_2 = 350$ pro Schenkelgruppe. Beide Gruppen waren parallel geschaltet, so daß r_2 etwa = 0,9 Ohm war. Der aktive Eisenquerschnitt war $7,25 \text{ cm}^2$, also sehr gering. Der primäre Hauptstrom, also der normale Belastungsstrom des zuschützenden Kabels, war 100 Amp.

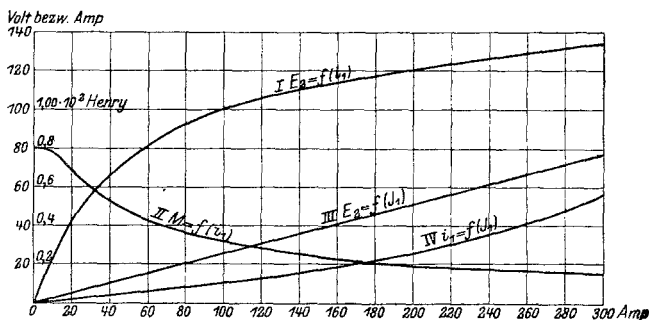


Fig. 9.

Kurve I zeigt den Verlauf der Sekundärspannung, Charakteristik eines Kabelschutzstromwandlers Type O 15 der AEG als Funktion der magnetisierenden Stromstärke bzw. Amperewindungen in der primären Wickelung bei 50 Perioden.

Kurve II desgleichen den Verlauf des Koeffizienten der gegenseitigen Induktion.

Kurve III den Verlauf der Sekundärspannung bei parallel geschaltetem Nickelwiderstand von 0,00478.

Man sieht, daß der Stromwandler schon bei $J_1 = 100 \text{ Amp.}$ sehr stark gesättigt ist, wenn er ohne Parallelwiderstand, daß dagegen die Sättigung aber selbst bei 3 facher Überlast noch wenig hervortritt, wenn der Stromwandler mit Parallelwiderstand benutzt wird.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen wollen wir das Verhalten des Schutzsystemes einer rechnerischen Untersuchung unterziehen.

a) Der Sicherheitsfaktor σ bei Schaltung II. Fig. 10 u. 11.

Wir vernachlässigen zunächst wieder den Einfluß der verteilten Kapazität und Selbstinduktion der Hilfsleitungen und der Sättigung. Die Kapazität der Hilfsleitungen sei $C_1 = 2 C$. Jeder Stromwandler arbeitet dann auf die Kapazität C . Die Schaltung ist unter diesen Vereinfachungen die der Fig. 10.

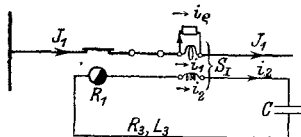


Fig. 10.

Das zugehörige Diagramm zeigt Fig. 11.
Nach Gleichung I ist

$$i_2 = \frac{i_1 \cdot \omega M}{\sqrt{R_2^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$= \frac{i_1 \omega^2 M C}{A_3},$$

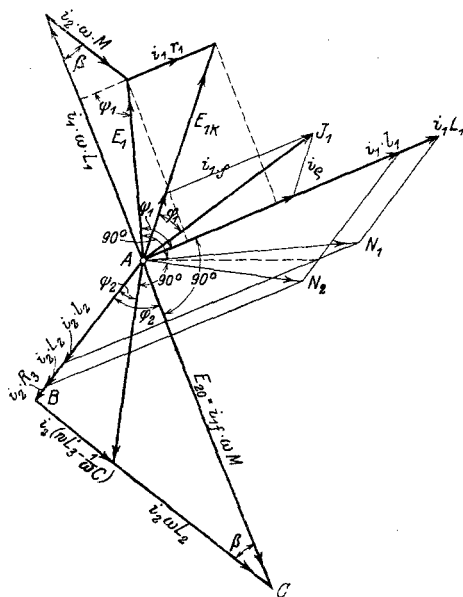


Fig. 11.

worin

$$A_3 = \sqrt{1 - \omega^2 (2 L_3 C - R_3^2 C^2) + \omega^4 L_3^2 C^2}$$

Also

$$E_{1K} = (i_1 \omega L_1 - i_2 \omega M \cos \beta)^2 + (i_2 \omega M \sin \beta + i_1 r_1)^2 = i_1 \cdot \frac{A_1}{A_3}$$

worin

$$A_1^2 = Z_1^2 A_3^2 + \omega^2 M^2 [\omega^4 M^2 C^2 - 2 (\omega^2 L_1 C (\omega^2 L_3 C - 1) - r_1 R_3 \omega^2 C^2)]$$

Da r_1 und ωC meist sehr kleine Größen sind, so wird

$$E_{1K} = \frac{i_1 \cdot \omega M \cdot A_0}{A_3},$$

worin

$$A_0 = \sqrt{(1 + \tau_1)^2 \gamma^2 A_3^2 + \omega^4 M^2 C^2 - 2 \omega^2 L_1 C (\omega^2 L_3 C - 1)}.$$

Es verhält sich also

$$\frac{i_1}{i_\rho} = \frac{\rho}{\omega M \frac{A_0}{A_3}} = \frac{\rho}{\omega L_1 \sqrt{1 + \frac{\omega^4 M^2 C^2 - 2 \omega^2 L_1 C (\omega^2 L_3 C - 1)}{(1 + \tau_1)^2 \gamma^2 A_3^2}}};$$

wenn die Glieder mit $\omega^2 C^2$ und die Streuung vernachlässigt werden können, so wird

$$\frac{i_1}{i_\rho} \cong \frac{\rho}{\omega L_1 \sqrt{\frac{1 - 2 \omega^2 C (L_3 - L_2)}{1 - 2 \omega^2 L_3 C}}} \sim \frac{\rho}{\omega L_1}$$

Diese Betrachtung gilt für jede Frequenz, also jede Harmonische und wir sehen in der Tat, daß sich ein ankommender Strom J_1 um so mehr auf den Parallelwiderstand verteilt, je höher seine Frequenz ist.

Ferner findet man, bei Vernachlässigung von $i_1 r_1$

$$\cos \psi_1 = \frac{i_2 \omega M \sin \beta}{E_1} = \frac{\omega^3 M C^2 R_3}{A_0 A_3}$$

$$J_1^2 = i_1^2 + i_\rho^2 - 2 i_1 i_\rho \cos (180^\circ - \psi_1)$$

$$J_1 = \frac{i_1}{A_3} \cdot \frac{B_1}{\rho}, \quad \dots \dots \dots 21)$$

worin

$$B_1 = \sqrt{A_3^2 (\rho^2 + \omega^2 L_1^2) + \omega^2 M^2 [(\omega^2 M^2 + 2 \rho R_3 - 2 \omega^2 L_1 L_3) \omega^2 C^2 + 2 \omega^2 L_1 C]} \quad 22)$$

Vernachlässigen wir wiederum die Streuung und ρ^2 gegen $\omega^2 L_1^2$, so wird $M^2 = L_1 L_2$, und setzen wir $L_3 = L'_3 + L_2$, so wird

$$B_1' = \omega M \sqrt{A_3'^2 \gamma^2 + 2 \omega^2 C^2 R_3 \rho}; \text{ worin } A_3' = \sqrt{1 - 2 \omega^2 L_3' C + \omega^2 C^2 (R_3'^2 + \omega^2 L_3'^2)} \quad 22a)$$

Drückt man J_1 als Funktion von i_2 aus, so wird allgemein:

$$J_1 = \frac{i_2 B_1}{\omega^2 M C \rho} \quad \dots \dots \dots 23)$$

Der Sicherheitsfaktor σ_{II} wird dann

$$\sigma_{II} = \frac{i_r}{J_1} \cdot \frac{B_1}{\omega^2 M C \rho} \quad \dots \dots \dots 24)$$

worin $i_r = i_2$ und σ_{II} zum Unterschiede gegen das σ_I bei Schaltung I gesetzt ist.

Vernachlässigen wir die Streuung und nehmen an, daß ρ^2 sehr klein gegen $\omega^2 L_1^2$ ist so wird mit Hilfe von 22a

$$\sigma_{II}' = \frac{i_r}{J_1} \cdot \frac{\sqrt{A_3'^2 \gamma^2 + 2 \omega^2 C^2 \rho R_3}}{\rho \cdot \omega C} \quad 24a)$$

$$= \frac{i_r}{J_1} \cdot \sqrt{\frac{A_3'^2 \gamma^2}{\omega^2 C^2 \rho^2} + 2 \frac{R_3}{\rho}}$$

Soll $\sigma_{II}' = \sigma_I$ sein, so muß, wenn $2 \frac{R_3}{\rho}$ klein gegen $A_3'^2 \frac{\gamma^2}{\rho^2} \frac{1}{\omega^2 C^2}$ ist,

$$\frac{i_r}{J_1} \cdot \frac{A_{3I}}{\omega^2 M_I C} = \frac{i_r}{J_1} \frac{A_{3II}'}{\omega C \rho}$$

oder es muß sein:

$$\omega M_I = \frac{\rho}{\gamma} \frac{A_{3I}}{A_{3II}'}$$

bzw.

$$\frac{\rho}{\gamma} = \omega M_I \cdot \frac{A_{3II}'}{A_{3I}}$$

Unter sonst gleichen Verhältnissen wird aber $\sigma_{II} > \sigma_I$, da (im allgemeinen) $\frac{B_1}{\rho} > A_{3I}$ ist

b) Der Empfindlichkeitsfaktor ε bei Schaltung II. Fig. 12 u. 13.

b) Wir bestimmen nunmehr die Empfindlichkeit ε_{II} und zwar wieder in dem Falle, daß ein dreiphasiger Kurzschluß von nur einer Seite gespeist wird. In diesem Falle ist die

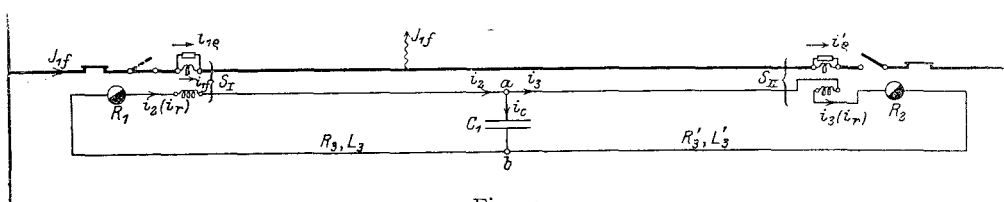


Fig. 12.

primär stromlose Stromwandlergruppe von dem Relaisstrom erregt und in dem besonderen vorliegenden Falle kurz geschlossen durch den Parallelwiderstand (Siehe Fig. 12.) Der auf den Kreis des Stromes i_3 reduzierte Widerstand der Primärwicklung und des Parallelwiderstandes ist

$$r_1' = \frac{r_1 + \rho}{(1 + \tau_1)^2 \gamma^2}.$$

Die reduzierte Selbstinduktivität ist

$$L_1' = \frac{L_1}{(1 + \tau_1) \gamma^2},$$

so daß für den Stromwandler S_{II} also in Frage kommt ein

$$L_2' = L_2 - \frac{L_1}{(1 + \tau_1)^2 \gamma^2}$$

$$\text{Da } L_2 = (1 + \tau_2) \frac{M}{\gamma}; \quad L_1 = (1 + \tau_1) M \gamma,$$

so ist:

$$L_1 = L_2 \gamma^2 \frac{1 + \tau_1}{1 + \tau_2}$$

und es wird:

$$L_2' = L_2 \frac{(1 + \tau_1)(1 + \tau_2) - 1}{(1 + \tau_1)(1 + \tau_2)} \sim 0.$$

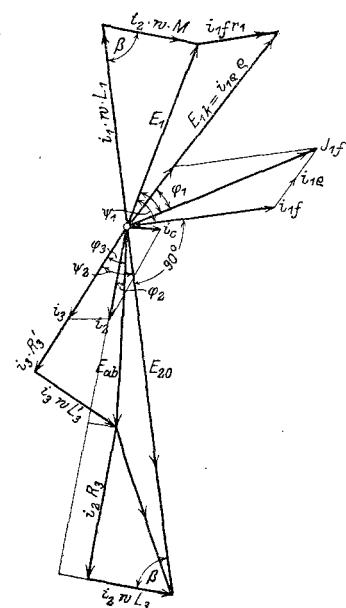


Fig. 13.

Nun ist aus dem Diagramm Abb. 13 leicht zu ersehen, daß

$$\cos \beta = \frac{E_{ab} \sin \varphi_2 + i_2 \omega L_3}{E_{20}} = \frac{\omega (L_3' + A_3'^2 L_3 - Z_3'^2 C_1)}{A_3' A_2}$$

$$\sin \beta = \frac{R_3' + A_3'^2 R_3}{A_3' \cdot A_2} \sim \frac{R_3' (1 + A_3'^2)}{A_3' \cdot A_2}.$$

Setzt man diese Werte in die Gleichung für E_1^2 ein, so wird:

$$E_1^2 = \frac{i_{1f}^2}{A_2^2} \left[\omega^2 L_1^2 A_2^2 + A_3'^2 \omega^4 M^4 - 2 \omega^2 M^2 \omega^2 (L_1 L_3' + A_3'^2 L_1 L_3 - Z_3'^2 L_1 C_1) \right]$$

$$E_1 = \frac{i_{1f} \cdot \omega \cdot M}{A_2} \cdot B_2 = i_3 B_2 = i_2 \cdot \frac{B_2}{A_3'} \quad \dots \dots \dots 32)$$

$$B_2 = \sqrt{A_2'^2 \gamma^2 (1 + \tau_1)^2 - A_3'^2 \omega^2 M^2 (2 (1 + \tau_1) (1 + \tau_1) - 1) - 2 \omega^2 \{ L_1 L_3' (1 + A_3'^2) - Z_3'^2 L_1 C_1 \}} \quad 33)$$

Vernachlässigt man die primäre und sekundäre Streuung, setzt also $(1 + \tau_1) = (1 + \tau_2) = 1$; $L_2 \gamma^2 = L_1$ und $M^2 = L_1 L_2$, so wird

$$B_2' = 2 \gamma \cdot Z_3' A_3'$$

Der Strom im Parallelwiderstande wird

$$i_p = \frac{E_1}{\rho} = i_3 \cdot \frac{B_2}{\rho} = i_2 \cdot \frac{B_2}{A_3'} \cdot \frac{1}{\rho} = i_{1f} \frac{\omega M}{A_2} \cdot \frac{B_2}{\rho}$$

Der Fehlerstrom J_{1f} wird dann unter Berücksichtigung, von $r_1 = 0$

$$J_{1f} = i_{1f} \frac{B_3}{A_2} \cdot \frac{1}{\rho} = i_2 \frac{B_3}{A_3'} \cdot \frac{1}{\omega M \rho} = i_3 \frac{B_3}{\rho} \cdot \frac{1}{\omega M} \quad \dots \dots \dots 34)$$

$$B_3 = \sqrt{A_2'^2 \rho^2 + \omega^2 M^2 (B_2'^2 + 2 \rho R_3' (1 + A_3'^2))} \quad \dots \dots \dots 35)$$

Also ergibt sich für die Empfindlichkeit:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{2II} &= \frac{J_1}{i_r} \cdot \frac{\omega M \cdot A_3'}{\left(\frac{B_3}{\rho} \right)} \\ \epsilon_{3II} &= \frac{J_1}{i_r} \cdot \frac{\omega M}{\left(\frac{B_3}{\rho} \right)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 36)$$

Der Index II ist zum Unterschiede gegenüber der Empfindlichkeit ohne Parallelwiderstand gewählt.

c) Das Produkt $\sigma \cdot \epsilon$; der Einfluss desselben auf die maximal schützbbare Leitungslänge; Vergleich mit Schaltung I.

Durch Multiplikation von Gleichung 24 und 32 finden wir

$$\epsilon_{3II} \cdot \sigma_{II} = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{B_1}{B_3}$$

Das Verhältnis $\frac{B_1}{B_3}$ wird, wenn wieder ρ^2 sehr klein gegen $\omega^2 L_1^2$ und $\tau_1 = \tau_2 = 0$, $Z_3 = Z_3'$ und $A_2'' = 2 A_3' Z_3'$ gesetzt werden kann,

$$\frac{B_1'}{B_3'} = \sqrt{\frac{A_3'^2 \gamma^2 + 2 \omega^2 C^2 R_3 \rho}{4 Z_3'^2 A_3'^2 \gamma^2 + R_3' \rho (1 + A_3'^2)}}$$

Da meist noch $2 \rho \omega^2 C^2 R_3$ klein gegen $A_3'^2 \gamma^2$ ist, so

$$\frac{B_1''}{B_3'} = \frac{A_3' \gamma}{\sqrt{4A_3'^2 \gamma^2 Z_3'^2 + 2R_3 \rho (1 + A_3'^2)}}$$

so folgt:

$$\epsilon_{3II} \cdot \sigma_{II} = \frac{1}{C \omega} \sqrt{\frac{A_3'^2 \gamma^2}{4A_3'^2 Z_3'^2 \gamma^2 + 2R_3 \rho (1 + A_3'^2)}} \quad 37a)$$

Wir sahen oben, daß die Empfindlichkeit von dem Verhältnisse $\frac{B_3}{\rho}$ abhängt.

Nun ist

$$\frac{B_3}{\rho} = \sqrt{A_2'^2 + \frac{\omega^2 M^2}{\rho^2} (B_2'^2 + 2\rho R_3' (1 + A_3'^2))}$$

Ferner war bei Vernachlässigung der Streuung nach Gleichung 33a

$$B_2'^2 = 4A_3'^2 \gamma^2 Z_3'^2$$

also wird, wenn die Bedingung angenähert erfüllt ist, daß $Z_3 \sim Z_3'$,

$$A_2'' \sim 2A_3' \cdot Z_3'$$

und es wird

$$\frac{B_3}{\rho} = \sqrt{4A_3'^2 Z_3'^2 \left(1 + \frac{\omega^2 L_1^2}{\rho^2}\right) + \frac{2R_3' (1 + A_3'^2)}{\rho}}$$

Wenn $\left(\frac{\omega L_1}{\rho}\right)^2$ groß gegen 1 gemacht wird, so vereinfacht sich $\frac{B_3}{\rho}$ zu

$$\frac{B_3'}{\rho} = \frac{\omega M}{\rho} \sqrt{4A_3'^2 Z_3'^2 \gamma^2 + 2R_3 \rho (1 + A_3'^2)}$$

Also wird unter den gemachten Vernachlässigungen

$$\epsilon_{3II} = \frac{J_1}{i_r} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{4A_3'^2 \gamma^2 \cdot Z_3'^2 + 2\rho R_3' (1 + A_3'^2)}} \quad 36a)$$

Die Empfindlichkeit geht also für höhere Frequenzen herab, was günstig ist.

Dieser Ausdruck stimmt aber mit dem für ϵ_3 in Gleichung 15b festgelegten überein, wenn

$$\frac{\omega M_I}{2A_{3I} Z_{3I}} = \frac{\rho}{\sqrt{4A_3'^2 \cdot Z_3'^2 \gamma^2 + 2R_3' \rho (1 + A_3'^2)}}$$

woraus man, solange $\omega M_I < 1$ und $\gamma > \frac{1}{50}$ ist, erhält

$$\frac{\rho}{\gamma} = \omega M_I \cdot \frac{Z_{3II}'}{Z_{3I}} \cdot \frac{A_{3II}'}{A_{3I}}.$$

Wir kommen also in dem Falle, wo der Leitungswiderstand und die Induktivität des Relais die der Sekundärwicklung überwiegt bei einem $\rho = \omega M_I \gamma \frac{Z_{3II}'}{Z_{3I}} \cdot \frac{A_{3II}'}{A_{3I}}$ zur gleichen Empfindlichkeit wie ohne den Parallelwiderstand. Dabei ist aber vorausgesetzt, daß im jetzigen Falle ist, damit Fehler kleiner als 1 % entstehen,

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\omega L_1}{\rho}\right)_{II} &\geq 100 \quad \text{oder} \quad \left(\frac{\omega M}{\rho}\right)_{II} &\geq 100 \\ \omega M_{II} &\geq 10 \cdot \omega M_I \cdot \frac{Z_{3II}'}{Z_{3I}} \cdot \frac{A_{3II}'}{A_{3I}} \end{aligned} \right\} \quad 38)$$

bzw.

ist.

Das heißt: es muß der Koeffizient der gegenseitigen Induktion im Falle der Schaltung II im allgemeinen größer als der im Falle der Schaltung I sein, wenn gleiche Empfindlichkeit erreicht werden soll.

Da eine ähnliche Bedingung auch für $\sigma_I = \sigma_{II}$ gefunden wurde, so hätte also die Schaltung II immerhin den Vorteil vor Schaltung I, daß gemäß Gleichung 21 und bei Vernachlässigung der Streuung und ρ^2 klein gegen $\omega^2 L_1^2$ in

$$i_1 = \frac{J_1}{\omega M_{II}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_{3II} \cdot \gamma}{A_{3I} \cdot \rho}\right)^2 + \frac{2 \omega^2 C^2 R_3}{\rho A_3^2}}} \quad \dots \quad 21a)$$

wird.

Die Gleichung 21a, b und 24a, ferner 37a besagen also, daß bei gleichem Primärstrom J_1 und unter — abgesehen vom Stromwandler sonst gleichen Hilfskreisverhältnissen bei Schaltung I und II — durch Anwendung des Parallelwiderstandes der Einfluß der höheren Harmonischen bedeutend verringert ist, trotzdem der gleiche Wert für σ und ε in beiden Fällen erreicht wurde. Das berechnete Verhalten des Schutzsystems wird also dem tatsächlichen viel besser entsprechen als bei Schaltung I, weil über die Art der Netzstromkurve so gut wie nichts anderes sich voraussagen läßt, als daß sie z. B. in Fällen von Erd- oder Kurzschlüssen die verwickeltesten Gestalten annehmen kann. Aber gerade in diesen Fällen sollen die gesunden Netzteile unbeeinflusst bleiben.

Man sieht aus Gleichung 37a deutlich, wie wenig $\sigma \varepsilon$ von ρ abhängt, bzw. dadurch verkleinert wird. Ist ρ so klein, daß das zweite Glied unter der Wurzel verschwindet, so wird

$$\varepsilon_{3II} \cdot \sigma_{II} = \frac{1}{2 \cdot Z_3' \omega C} = \varepsilon_I \sigma_I \cdot \frac{Z_{3I}}{Z_{3II}}$$

Durch Quadrieren der Gleichung 37a findet man:

$$2 \rho R_3' (1 + A_3'^2) \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2 = A_3'^2 \gamma^2 (1 - 4 Z_3'^2 \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2)$$

hieraus ergibt sich:

$$\gamma = \left(\frac{\rho}{\gamma} \right) \frac{2 R_3' (1 + A_3'^2) \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2}{A_3'^2 (1 - 4 Z_3'^2 \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2)}$$

Diese Beziehung gilt aber nur, so lange sich γ größer als etwa $\frac{1}{50}$ ergibt. Ist das nicht der Fall, so darf $\sigma \varepsilon$ größer eingesetzt werden. Es kann also hieraus auch $\varepsilon \sigma$ berechnet werden.

Nehmen wir zunächst $Z_{3I} = Z_{3II}$ an, so ist $\frac{\rho}{\gamma} = \omega M_I$ und somit

$$\gamma = \omega M_I \cdot \frac{2 R_3' (1 + A_3'^2) \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2}{A_3'^2 (1 - 4 Z_3'^2 \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2)} \quad \dots \quad 39)$$

Aus dieser Bedingung für γ folgt aber dann

$$\rho = \omega M_I \gamma \quad \dots \quad 40)$$

wodurch wir die Berechnung der Schaltung II auf die einfachere der Schaltung I zurückgeführt haben. Wir berechnen also erst für $Z_{3I} = Z_{3II}$ und einen gegebenen Empfindlichkeits- oder Sicherheitsfaktor ωM_I aus Gleichung 15b oder 2 und dann γ und ρ . ωM_{II} muß dann etwa 10 ωM_I gewählt werden, wenn die berechneten Werte für γ und ρ einigermaßen genau sein sollen.

Aus der Gleichung 39 folgt, daß γ positiv ist, wenn

$$1 > 4 Z_3'^2 \varepsilon^2 \sigma^2 \omega^2 C^2 \text{ ist.}$$

Daraus können wir aber die maximale Leistungslänge finden. Angenähert darf Z_3' dem Leitungswiderstande proportional gesetzt werden, da dieser meist den Ausschlag gibt.

$$\text{Also: } Z_3 = k R_3 = k \cdot r \frac{\lambda}{2}$$

$$C = \frac{\lambda}{2} c_1$$

also muß:

$$\lambda < \sqrt{\frac{1}{r \cdot c_1 \cdot k}} \sqrt{\frac{1}{\omega}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon \sigma}} < F_{II} \cdot \sqrt{\frac{1}{kr \cdot \omega c_1}} \quad \dots \quad 41)$$

sein.

In der Tabelle III sind für $v = 50$, $\omega = 314$, für verschiedene Werte $\sigma \varepsilon$ die Werte für $F_{II} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon \sigma}}$ zusammengestellt:

$$\text{Tabelle für } F_{II} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon \sigma}}.$$

$\sigma \varepsilon = 20$	$F_{II} = 0,316$
$\sigma \varepsilon = 10$	$F_{II} = 0,447$
$\sigma \varepsilon = 8$	$F_{II} = 0,500$
$\sigma \varepsilon = 6$	$F_{II} = 0,578$
$\sigma \varepsilon = 4$	$F_{II} = 0,707$
$\sigma \varepsilon = 2$	$F_{II} = 1,000$

Vergleichen wir die Werte mit den auf Seite 14 für die Schaltung I ermittelten, so finden wir vollkommene Übereinstimmung. Wir kommen also bei gleicher Frequenz zu annähernd gleichen Leitungslängen.

Unser oben durchgeführter Vergleich zwischen Schaltung I und II fußte darauf, daß $Z_{3I} = Z_{3II}$ war. Nun mußte aber, um die höheren Harmonischen nach Möglichkeit unschädlich zu machen, bei Schaltung I $R_3 = \sqrt{2} \frac{L_3}{C}$ sein. Erst bei den Grenzlängen stimmen also die Hilfskreiswiderstände bzw. Impedanzen bei beiden Schaltungen überein. In den meisten praktischen Fällen trifft das aber nicht zu und dann muß bei Schaltung I ein besonderer Widerstand vorgeschaltet werden. Wird aber ein solcher Widerstand vorgeschaltet, so wird nach Gleichung 2 und 26

$$\sigma_{II}^2 = \omega^2 M_I^2 \left[\left(\frac{A_{3II}'^2}{A_{3I}} \right)^2 \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^2 + \frac{2 \omega^2 C^2 R_3'_{II}}{\rho} \right] \sigma_I^2 \quad \dots \quad 42)$$

oder angenähert, wenn gleiche Empfindlichkeit ε vorausgesetzt wird.

$$\sigma_{II} = \sigma_I \cdot \frac{Z_{3I}}{Z_{3II}} \sqrt{1 + \frac{2 \omega^2 C^2 R_3 \rho}{\gamma^2 A_{3II}^2}}$$

Da infolge des Parallelwiderstandes $\gamma_{II} < \gamma_I$ genommen werden darf, so sieht man hieraus deutlich, wie sehr σ durch den Parallelwiderstand in die Höhe gehen kann. Man kann sich dies sehr leicht mit Hilfe des Energieprinzips klar machen: Infolge des Parallelwiderstandes gehe von einer höheren Harmonischen nur der a^{te} Teil in den Stromwandler, in dem magnetischen Felde speichert er eine magnetische Energie

$$p_{II} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{J_1}{a} \right)^2 L_{1II} = \frac{1}{2} \left(\frac{J_1}{a} \right)^2 L_{1I} \cdot 10 \cdot \frac{\gamma_{II} Z_{3II} \cdot A_{3II}'}{\gamma_I \cdot Z_{3I} \cdot A_{3I}}$$

auf gegen $p_I = \frac{J_1^2 L_{1I}}{2}$ bei Schaltung I. Da meist $a > 10$, so ist

$$P_{II} = P_I \cdot \frac{1}{10} \frac{\gamma_{II} \cdot Z_{3II} \cdot A_{3'II}}{\gamma_I \cdot Z_{3I} \cdot A_{3I}} < P_I.$$

Da also weniger magnetische Energie in Ladungsenergie für das Hilfskabel umgewandelt wird, so ist der Sicherheitsfaktor $\sigma_{II} > \sigma_I$.

Der Wert von $\frac{Z_{3II} A_{3'II}}{Z_{3I} \cdot A_{3I}}$ wiegt bei Kabeln von nicht zu hohem Widerstande den Faktor 10 häufig zum großen Teile wieder auf, so daß oft M_{II} nicht zehnmal größer als M_I zu sein braucht.

Noch ein anderer Punkt bedarf der Beachtung, nämlich die Isolation des Hilfsleitungs-kreises. Bei gleichem Relaisstrom und gleicher Empfindlichkeit muß im normalen Betriebe die Spannung am Hilfskabel um so höher sein, je höher die Impedanz des Hilfskreises ist. Wird bei Schaltung I also $R_3 = \sqrt{\frac{2 L_3}{C}}$ gemacht und dieser Wert durch besondere Vorschaltwiderstände erreicht, so ist bei Schaltung I die Spannung E_2 also höher als bei Schaltung II und die Gefahr des Durchschlages des Hilfskreises infolge von Stromstößen also um so größer.

Die Spannung E_{2I} ist bei Schaltung II, wenn $J_1 = J_1'$ ist,

$$E_{2I} = i_2 \sqrt{R_3^2 + \left(\omega L_3' - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = J_1 \cdot \frac{A_{3'} \omega M \rho}{B_1} \quad . \quad . \quad . \quad 43)$$

oder angenähert bei normaler Frequenz

$$E_{2I} = J_1 \cdot \frac{\rho}{\gamma} = J_1 \cdot \omega M_I \frac{Z_{3II}}{Z_{3I}} \cdot \frac{A_{3'II}}{A_{3I}} = (E_{2I})_I \frac{Z_{3II}}{Z_{3I}^3} \cdot \frac{A_{3II}}{A_{3I}}$$

Da meist aber hier Z_{3I} relativ groß gegen Z_{3II} ist, so folgt, daß bei $J_1 = J_\sigma$

$$E_{2I\sigma} = E_{1I\sigma} \frac{Z_{3II} A_{3II}}{Z_{3I} \cdot A_{3I}}$$

nicht so hoch ansteigt als bei Schaltung I.

Der Einfluß der verteilten Kapazität der Hauptleitungen. Hierüber ist gegenüber dem auf Seite 15 und 16 Ausgeführten nichts neues einzufügen. Die dortigen Erörterungen besitzen ganz allgemeine Gültigkeit.

6. Untersuchung der Schaltung III (Brückenschaltung). Fig. 3; 14—17. Während bei den seither behandelten Schutzsystemen im normalen Betriebszustande der Hauptleitungen infolge der Gegenschaltung zweier Stromwandler ein und derselben Phasenleitung in dem Hilfskreise nur Ladestrom fließt, sind bei dieser Schaltung die Sekundärwicklungen ein und derselben Phasenleitung hintereinander geschaltet. Es fließt jetzt also betriebsmäßig Strom in den Hilfsleitungen. Das Relais liegt nicht mehr im Hilfskreise, sondern parallel dazu und zwar als Brücke zwischen den Halbierungspunkten der Hilfsleitungen P_1, P_2, P_3 .

a) Der Sicherheitsfaktor σ bei Schaltung III.

Diese Punkte P_1, P_2, P_3 weisen betriebsmäßig dann, wenn $J_1 = J_1'$ sowohl nach Größe wie Phase ist, keine Spannung gegeneinander auf, sind also gerade geeignet für den Anschluß eines Relais.

Der Sicherheitsfaktor eines derartigen Schutzsystems ist also unendlich groß. Dies Schutzsystem eignet sich auch für Hilfsfreileitungen, weil jene Punkte P_1, P_2, P_3 die günstigsten Anschlußpunkte sind für solche Apparate, die atmosphärische Ladungen ableiten oder die Störungen unschädlich machen sollen, welche auf die magnetische und elektrische Verkettung der Haupt- und Hilfsleitungen zurückzuführen sind. Derartige

Apparate sind z. B. die sogenannten Ableitungsdrösselpulen ¹⁾, Blitzableiter und andere Apparate. Auf Störungen der erwähnten Art ist natürlich bei dem Bau solcher Hilfsfreileitungen Rücksicht zu nehmen und von Kreuzungen der Haupt- und Telefonleitungen Gebrauch zu machen.

Der Umstand, daß $\sigma = \infty$ ist, macht dies Schutzsystem gerade für lange Leitungen sehr brauchbar. Es ist dann die Empfindlichkeit lediglich mit Rücksicht auf die Kraftleitungen festzusetzen. Höhere Harmonische haben auf σ keinen Einfluß.

b) Der Empfindlichkeitsfaktor ϵ bei Schaltung III.

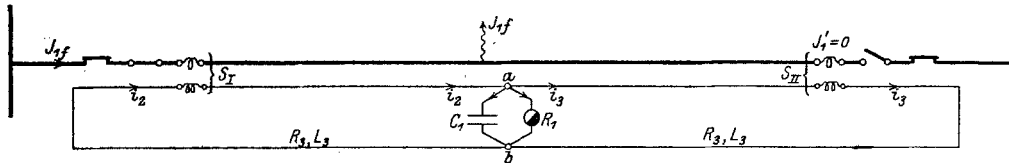


Fig. 14.

Die Spannung am Relais sei E_r .

Dann ist gemäß Abb. 14

$$\left. \begin{aligned} i_r &= \frac{E_r}{\omega L_r}; \quad i_c = E_r \cdot \omega C_1 \\ i_2 &= \frac{i_3}{Z_3} \sqrt{\omega^2 L_r^2 + Z_3^2 (1 - \omega^2 L_r C_1) + 2 \omega^2 L_r L_3 (1 - 2 \omega^2 L_r C_1)} \end{aligned} \right\} \quad \cdot \quad 45)$$

oder abgekürzt

$$i_2 = i_r \cdot \frac{A_r}{Z_3}$$

Ist $\varphi_2 = \angle E_r, i_2$, so gemäß Diagramm Fig. 15

$$\sin \varphi_2 = \frac{\omega^2 L_3 L_r + Z_3^2 (1 - \omega^2 L_r C_1)}{Z_3 \cdot A_r}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_3 \omega L_r}{Z_3 \cdot A_r}$$

Dann ist

$$E_{20}^2 = (E_r \cos \varphi_2 + i_2 R_3)^2 + (E_r \sin \varphi_2 + i_2 \omega L_3)^2$$

$$= E_r^2 \left[1 + \frac{A_r^2}{\omega^2 L_r^2} + \frac{2 (\omega^2 L_r^2 + \omega^2 L_r L_3 (1 - \omega^2 L_r C_1))}{\omega^2 L_r^2} \right]$$

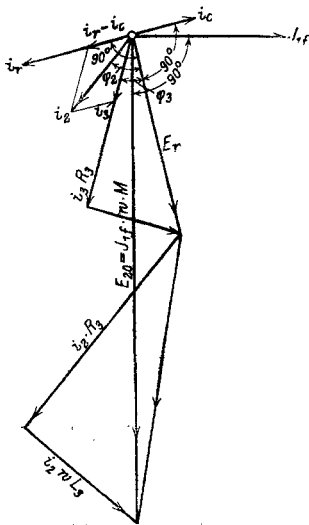


Fig. 15.

$$E_{20} = E_r \cdot \sqrt{4 + \frac{(Z_3^2 (1 - \omega^2 L_r C_1) + 4 \omega^2 L_r L_3) (1 - \omega^2 L_r C_1)}{\omega^2 L_r^2}} = J_{1f} \cdot \omega \cdot M \quad \cdot \quad 46)$$

$$\epsilon = \frac{J_1}{E_r} \cdot \frac{\omega M}{\sqrt{4 + (Z_3^2 (1 - \omega^2 L_r C_1) + 4 \omega^2 L_r L_3) (1 - \omega^2 L_r C_1)}} \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad 47)$$

Die Empfindlichkeit wird ein Maximum, wenn der Bruch im Nenner verschwindet,

¹⁾ Siehe hierüber die Arbeiten von Schrottke ETZ. 1907. S. 685. Brauns ETZ. 1908. S. 377. Dr. Behn-Eschenburg ETZ. 1908. S. 925. Dr. Petersen: Hochspannungstechnik, S. 350.

d. h. wenn die Induktivität des Relais mit der Kapazität C_1 der Hilfsleitung in Resonanz ist, also

$$L_r = \frac{I}{\omega^2 C_1} = \frac{P_r}{i_r^2 \omega} \quad P_r = \text{Relaisvolt-Ampere pro Phase}$$

$$i_r = \sqrt{\frac{P_r}{\omega C_1}}.$$

Dann wird

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{\max} &= \frac{J_1 \cdot \omega M}{2 E_r} = J_1 \cdot i_r \cdot \frac{\omega M}{2 P_r} \\ \epsilon_{\max} &= J_1 \cdot \frac{\omega M}{2} \cdot \frac{I}{\sqrt{\omega C_1 \cdot P_r}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots 48 a)$$

Das heißt also: das Schutzsystem hat eine um so größere Empfindlichkeit, je größer der Relaisstrom ist, wenn das Relais in Resonanz mit der Leitungskapazität gebracht wird. Dieses Ergebnis gilt natürlich mit der Annäherung, welche der Ersatz der verteilten Kapazität durch einen in der Leitungsmitte konzentrierten Kondensator C_1 mit sich bringt. Es zeigt sich aber deutlich, wie hier die Hilfskreiskapazität mithilft, die Empfindlichkeit zu steigern.

Von den 3 behandelten Schaltungsarten ist die Schaltung III also die bei weitem günstigste. Sie erfordert allerdings die Anbringung des Relais „auf der Strecke“, also dort, wo es der Betriebskontrolle nicht so zugänglich ist. Die einfache Bauart eines solchen Relais läßt dies aber wohl zu. Es läßt sich aber erreichen, daß die Punkte P_1, P_2, P_3 bis in eine der Stationen verschoben werden. Dies ist in Schaltung IV (Fig. 16) geschehen. In

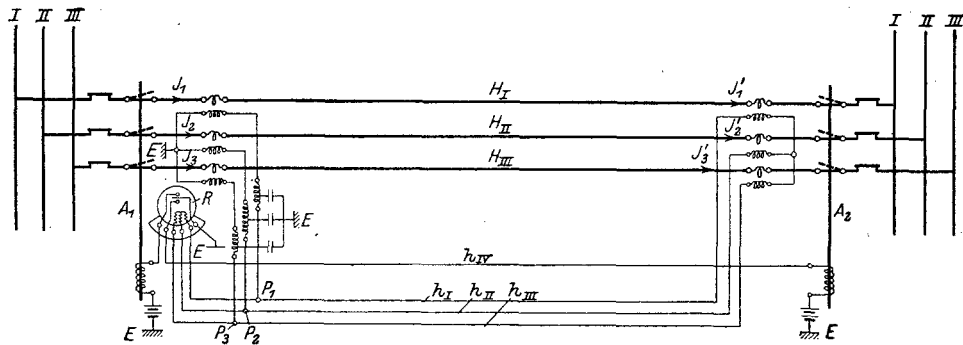


Fig. 16. Schaltung IV.

einer Schaltstation ist eine Kombination aus Widerständen, Induktivitäten und Kondensatoren vorgeschaltet, so daß die Punkte mit der Spannungsdifferenz Null sich in der Station selbst befinden.

Als Abschluß unserer Betrachtungen führen wir noch eine ähnliche Schaltung an. (Schaltung V, Fig. 17). Die eingehende Untersuchung bietet gegenüber den ausführlichen Betrachtungen bei den Schaltungen I bis III wenig neues und soll daher davon abgesehen werden. Es sei nur noch darauf hingewiesen, daß jede Verschiebung des Relais von den Punkten der Spannungsdifferenz Null den Sicherheitsfaktor herabsetzt. Werden z. B. statt eines Relais, 2 an den Enden der Hilfsleitung angebracht, so müssen die Relais für eine so hohe Spannung gewickelt sein, daß sie erst beim σ fachen des normalen Stromes in der Hilfsleitung, also beim σ fachen des durch ihn in der halben Hilfsleitung erzeugten Spannungsabfalles erreicht wird. Ist dieser Wert zu hoch, so muß eigens für die Relais, die hier zweckmäßig als Auslösemagnete der Schalter ausgebildet werden, die Hilfsleitungsspannung

herabtransformiert werden. Die Empfindlichkeit bei einseitiger Spannung eines Fehlers ist dann sehr gering, sie kann nur dadurch erhöht werden, daß man sich bei einseitiger Speisung des Fehlers damit begnügt, nur den Schalter selbsttätig öffnen zu lassen, von welchem der Strom kommt. Dann ist aber angenähert der $\frac{\sigma}{2}$ fache des normalen Hauptleitungsstromes als Fehlerstrom J_{1f} ausreichend. Es wird also

$$\varepsilon = \frac{J_{1f}}{\frac{\sigma}{2} J_1} = \frac{2}{\sigma}$$

also sehr klein, wenn man erwägt, daß σ mindestens 20 sein sollte.

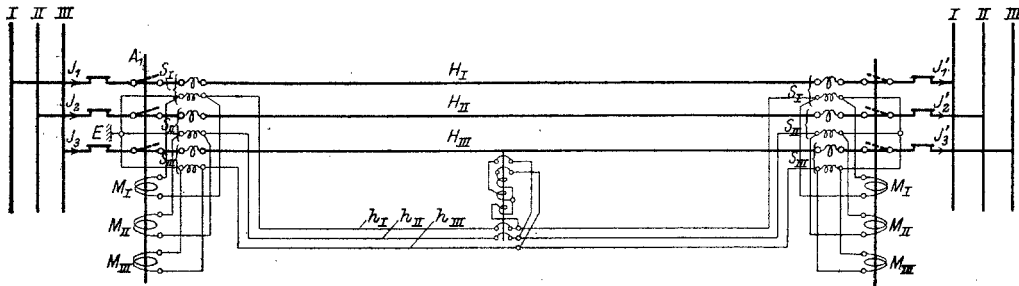


Fig. 17. Schaltung V.

Verbessernd wirkt in diesem Falle wieder die Anbringung eines Relais, welches zwischen den normal spannungslosen Punkten liegt und zunächst anspricht, wobei es zwei Hilfsleitungen und seinen eigenen Stromkreis unterbricht. Dadurch steigt die gesamte Impedanz der Hilfsleitungen auf den angenäherten Wert $1 : \omega C$. Hierin ist C die Kapazität der halben Hilfsleitung. Da deren Ladestrom aber um 180° gegen den Magnetstrom annähernd verschoben ist, so erhalten wir in den Magneten jetzt bei gleichem primären Fehlerstrom einen weit größeren Strom als vorher und die Magnete lösen also viel früher aus. Die Empfindlichkeit kann durch die Unterbrechung der Hilfsleitung also bedeutend erhöht werden.

Aus allen Betrachtungen geht hervor, daß das Verhalten der Differentialschutzsysteme durch die beiden Größen, Sicherheits- und Empfindlichkeitsfaktor, gekennzeichnet werden kann. Der bedeutendste Vorteil der Differentialschutzsysteme vor den gewöhnlichen Überstromschutzsystemen liegt darin, daß, sobald ein bestimmter Typ Stromwandler, Relais und Hilfskabel für den Differentialschutz eines Netzes festgelegt ist, das aus ihnen gebildete Schutzsystem in seiner Wirkungsweise gar nicht durch die Veränderungen beeinflusst wird, welche im Laufe der Jahre mit dem Netze vor sich gehen. Ein weiterer Vorteil ist der, daß die Betriebsleitung des mit Differentialschutz versehenen Netzes für alle Leitungen, deren Längen bei den verlangten Werten des Sicherheitsfaktors zulässig sind, sich um die Einstellung von Relais nicht zu kümmern braucht, ohne Gefahr zu laufen, daß der nächste Netzfehler eine Verwirrung des Betriebes hervorruft. Diese Vorteile sind aber für die zukünftige Entwicklung der elektrischen Kraftübertragung nicht zu unterschätzen, umsomehr noch, als bereits bei der Projektierung der Netze die nötige Einwirkung auf die Stabilität der Stromversorgung genommen werden kann.