

Tücken der Netzberechnung

Fehler beim Austausch der Sprinkleranlage in einem Verwaltungsgebäude

In diesem Beitrag wird ein Projekt aus der Praxis besprochen, bei dem eine alte Sprinkleranlage eines größeren Verwaltungsgebäudes gegen eine neue, leistungsfähigere ausgetauscht wurde – leider mit vorherigen Fehlern bei der Netzberechnung mit einer Software. Es wird auf einige Planungsversäumnisse und -fehler aufmerksam gemacht und die Planungsaspekte zum Anschlusspunkt einer Sprinkleranlage im Netz werden diskutiert.

In einem Verwaltungsgebäude wurde innerhalb des bestehenden SV-Netzes die alte Sprinkleranlage gegen eine neue und leistungsfähigere ersetzt. Das SV-Netz wird gemäß dem skizzierten Übersichtsschaltbild (Bild 1) im AV-Betrieb (bei der ungestörten allgemeinen Stromversorgung) aus dem Transformator und im SV-Betrieb (bei der gestörten/ausgefallenen allgemeinen Stromversorgung) aus dem Stromerzeugungsaggregat (Sicherheitsstromquelle) versorgt.

Die MS-Schaltanlage, der Transformator, das Stromerzeugungsaggregat, die NS-Schaltanlagen, die Kabelanlagen sowie die Stromschienenverteiler blieben bei dem Austausch der Sprinkleranlage unverändert.

Seitens der Elektrofachplanung wurde entschieden, die neue Sprinkleranlage dem neuen Sprinklerversorgungskonzept entsprechend von der Unterverteilung UV-SV-2 einzuspeisen. In der UV-SV-2 war der Leistungsschalter Q9 als Reserve vorhanden.

In dem Zusammenhang berechnete und betrachtete die Elektrofachplanung die Zuleitung der neuen Sprinkleranlage sowie den genannten freien Leistungsschalter Q9. Hierfür wurde eine der besten Berechnungssoftwares für die Netzberechnung angewendet und die Ergebnisse dokumentiert.

Überprüfung zeigt ernste Probleme auf

Nachdem, den Ergebnissen der durchgeführten Netzberechnung entsprechend, die Zuleitung der neuen Sprinkleranlage verlegt wurde, verlangte der TÜV im Rahmen der technischen Abnahme und zur Einstellung

des Leistungsschalters Q9 eine abschließende Netzberechnung. Dafür wurde ein Spezialist für die Netzberechnung engagiert.

Die neue Netzberechnung wurde für folgende Betriebsarten erstellt:

1. SV-Netz mit Speisung aus dem Transformator und
 2. SV-Netz im Generatorinselbetrieb mit Speisung aus dem Stromerzeugungsaggregat.
- Im SV-Netz sollen unter anderem folgende Kriterien gleichzeitig erfüllt sein:

- a) der Netzschutz muss erfüllt sein;
- b) der Netzschutz muss dabei den Anlauf der Sprinkleranlage ermöglichen;
- c) die selektive Fehler- bzw. Kurzschlussabschaltung soll ebenso gewährleistet sein.

Die Kriterien a), b) und c) müssen für die beiden genannten Netzbetriebsarten erfüllt sein. Im Generatorinselbetrieb soll auch der dynamische Spannungsfall während des Anlaufs der Sprinkleranlage an den Ausgangsklemmen des Generators moderat sein und die anderen SV-berechtigten Verbraucher nicht stören.

Dabei wurden zwei Kaskaden der Überstromschutzvorrichtungen betrachtet. Die erste Kaskade stellt die Reihenschaltung aller Überstromschutzvorrichtungen ausgehend von der MS-Schaltanlage bis zur Sprinklerzentrale dar. Die zweite Kaskade enthält alle in Reihe geschalteten Überstromschutzvorrichtungen, ausgehend vom Generatorschalterschrank bis zur Sprinklerzentrale.

Kleinste Kurzschlussströme im Bereich des Anlaufstromes

Die neuen durchgeführten Kurzschlussstromberechnungen sowie die messtechnischen Untersuchungen der Anläufe der Sprinkleranlage ergaben, dass die für die Ansprechbarkeit des Netzschutzes kritischen kleinsten Kurzschlussströme, die für die Einstellung des Leistungsschalters Q9 maßgebend sind, im Bereich des Anlaufstromes der Sprinkleranlage liegen. Und zwar sowohl im AV- als auch im SV-Betrieb des SV-Netzes.

Das bedeutet, die Einstellungen des Leistungsschalters Q9, die den Netzschutz gerade noch sicher gewährleisten würden, würden den Anlauf der Sprinkleranlage unterbrechen (der Leistungsschalter Q9 würde dabei auslösen). Die Einstellwerte des Leistungsschalters Q9, die den Anlauf der Sprinkleranlage ermöglichen würden, würden den Kurzschlusschutz sowie den Schutz gegen elektrischen Schlag nicht erfüllen können.

Aus dieser unangenehmen Situation könnte man sich befreien, wenn der Leistungsschalter Q9 über ein LSI-Überstromauslösungssystem verfügen würde und eine selektive Zeitstaffelung des Leistungsschalters Q9 und aller ihm vorgeschalteten Leistungsschalter sowohl in Richtung zur MS-Schaltanlage als auch zum Generatorschalterschrank realisierbar wäre. Leider war das hier nicht der Fall.

Analyse der ersten Netzberechnung

Bei der Analyse der ersten Netzberechnung stellten sich folgende Versäumnisse und Fehler heraus:

- Eine vorhandene Generatorsternpunktrossel (der Generator stammt aus den frühen siebziger Jahren!) wurde in der Netzberechnung gar nicht berücksichtigt; sie beeinflusst aber die Einstellung des Netzschutzes in der elektrischen Nähe des Generators. Bei solchen alten Generatoren soll immer geprüft werden, ob sie mit einer Strombegrenzungsdrossel ausgestattet sind, denn bei alten Synchrongeneratoren, bei denen die 2/3 gesehnte Wicklungstechnik noch nicht verwendet wurde, bilden sich Oberschwingungsspannungen dritter Ordnung, die bei Parallelbetrieb mit Transformatoren und anderen Synchrongeneratoren Oberschwingungsströme dritter Ordnung über die Sternpunkte treiben und die Sternpunkte überlasten. Die vorhandene Spule dämpft die Ströme im Nullsystem, also auch die einpoligen Kurzschlussströme, die bei der Einstellung des Netzschutzes wichtig sind.

- Im Generator-Schalterschrank befindet sich ein Generatorschalter, der kein Leistungsschalter ist; es ist lediglich ein Lasttrennschalter, der zusammen mit einem Überstrom-Zeit-Relais den Sekundärschutz des Generators darstellt. In der Netzberechnung fungiert aber als Generatorschalter ein Leistungsschalter, also mit dem integrierten Überstromauslöser. Der Generatorschalter ist de facto nicht korrekt nachgebildet – das bedeutet, dass dadurch die Beurteilung der Abschaltbedingungen, des Überlastschut-

Autor

Dipl.-Ing. (Univ.) Dragan Sofic ist Abteilungsleiter des Fachbereichs Netzberechnung & Netzanalyse bei EAB Elektroanlagenbau GmbH Rhein/Main, Dietzenbach.

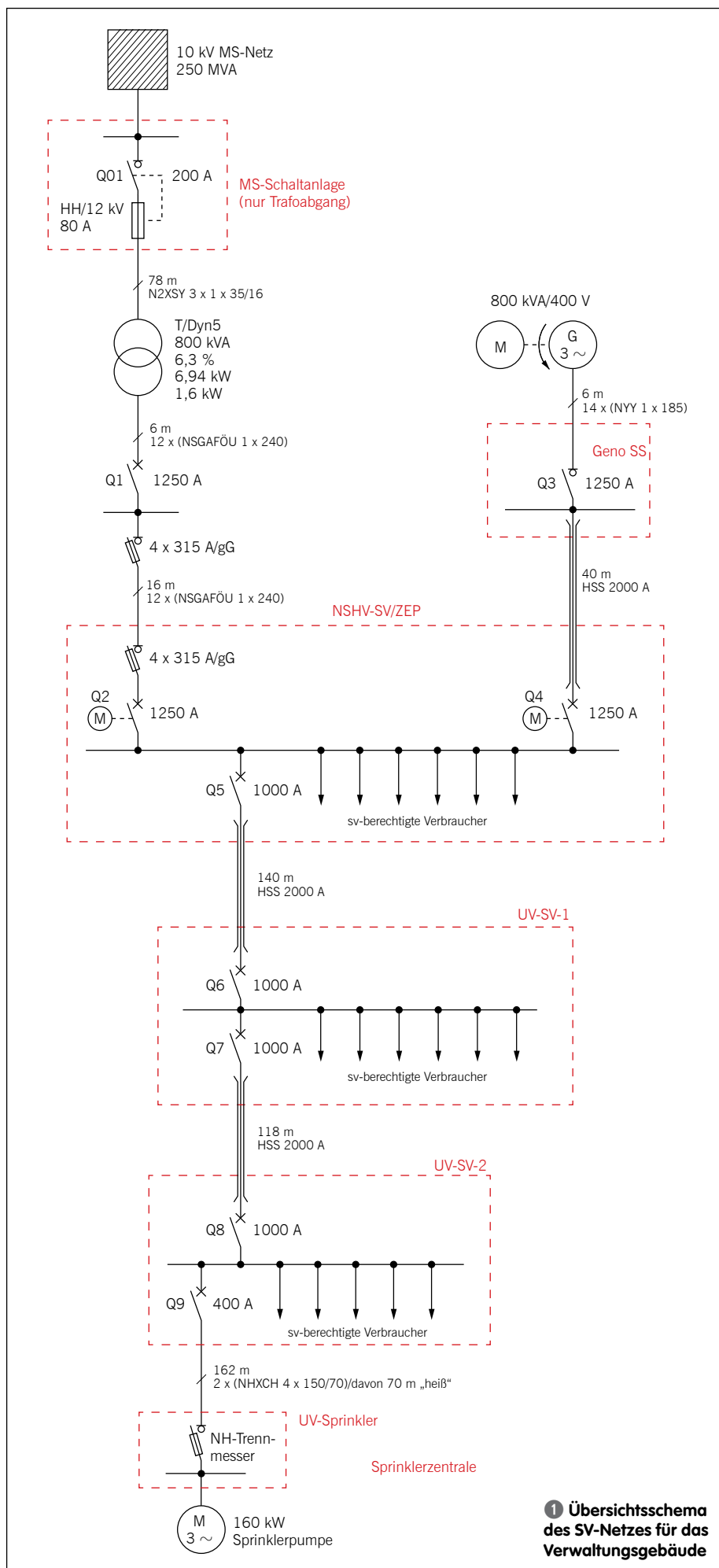
zes, des Schutzes bei Kurzschluss sowie der Selektivitätsverhältnisse nicht korrekt ist;

- Der genannte Lasttrennschalter ist bei dem Parallelbetrieb des Notstromaggregates mit dem Netz besonders gefährdet bzw. ist nicht kurzschlussfest bzw. er verfügt hierfür über kein entsprechendes Ausschaltvermögen; ferner ist er sogar zur Abschaltung der Kurzschlussströme (sowohl Anfangskurzschlusswechselströme als auch Dauerkurzschlusswechselströme) im Generatorinselbetrieb nicht geeignet,

- Alle Leistungsschalter vor Ort sind von einem Hersteller, befinden sich aber nicht in der Datenbank des Berechnungsprogrammes – in der Netzberechnung wurden Leistungsschalter von einem anderen Hersteller, die andere Kennlinien haben als die vor Ort, verwendet. Somit sind die Leistungsschalter vor Ort in der Netzberechnung nicht korrekt nachgebildet, was bedeutet, dass dadurch die Beurteilung der Abschaltbedingungen, des Überlastschutzes, des Schutzes bei Kurzschluss sowie der Selektivitätsverhältnisse nicht den wahren Verhaltensweisen der Schalter vor Ort entspricht, denn zwei nullpunktlöschende bzw. offene Leistungsschalter des gleichen Bemessungsstromes von zwei verschiedenen Herstellern, ausgestattet z. B. mit dem LSI-Überstromauslösungssystem, verhalten sich unter Fehlerbedingungen bzw. bei Kurzschluss in der Regel nicht identisch, obwohl sie gleich eingestellt sind (gleiche Einstellwerte haben); das gilt auch für zwei strombegrenzende bzw. kompakte Leistungsschalter.

- Alle Stromschienenverteiler vor Ort sind von einem Hersteller, befinden sich aber nicht in der Datenbank des Berechnungsprogrammes – in der Netzberechnung wurden sie nicht korrekt nachgebildet (deren Impedanzen im Mit- und Nullsystem entsprachen nicht den Stromschienenverteilern vor Ort), was bedeutet, dass sich dadurch andere Berechnungsergebnisse der Kurzschlussbelastungen ergeben, denn auch zwei Stromschienenverteiler des gleichen Bemessungsstromes von zwei verschiedenen Herstellern haben in der Regel nicht identische Impedanzbeläge, und zwar sowohl nach den symmetrischen Komponenten als auch nach dem Schleifenwiderstandsverfahren ermittelt.

Die Kenntnis der elektrischen Eigenschaften/Kenndaten der Sprinkleranlage und des Versorgungs- bzw. Verbrauchernetzes ist für die Auswahl des Anschlusspunktes der Sprinkleranlage bei deren Einspeisung aus dem Netz der allgemeinen Stromversorgung unabdingbar.



Quelle: D. Sofic/ep

Die Kenntnis der elektrischen Eigenschaften/ Kenndaten der Sprinkleranlage und des Synchrongenerators bzw. des Stromerzeugungsaggregates dient zur Überprüfung der Realisierbarkeit der Versorgung der Sprinkleranlage durch das vorhandene Stromerzeugungsaggregat.

Sprinkleranlage – einige elektrische Planungsmerkmale

Bei einer Sprinkleranlage treibt ein Drehstrom-Asynchronmotor (im weiteren Text Motor) eine Pumpe an. Dass der Motor zwischen Leerlauf und Bemessungsbetrieb seine Drehzahl geringfügig absenkt (Schlupf = s), stört die Pumpe nicht.

Für die Planung sind folgende Betriebsarten relevant: Leerlaufbetrieb, Anlaufbetrieb, Bemessungsbetrieb sowie Kurzschlussfall.

Um den Anlaufstrom bei der Motorzuschaltung zu begrenzen, wird der klassische Stern-Dreieck-Anlauf verwendet.

Zuerst wird der Motor in Sternschaltung hochgefahren, wodurch die Strangspannung mit dem $1/\sqrt{3}$ -fachen der Strangspannung im Dreieck betrieben wird.

Dadurch sinkt der Strangstrom auf $1/\sqrt{3}$ und der Außenleiterstrom auf ein Drittel des Anlaufstromes in Dreieckschaltung ab.

Das Anzugsmoment ist von der Strangspannung quadratisch abhängig und sinkt somit auch auf ein Drittel des Anzugsmomentes in Dreieckschaltung ab.

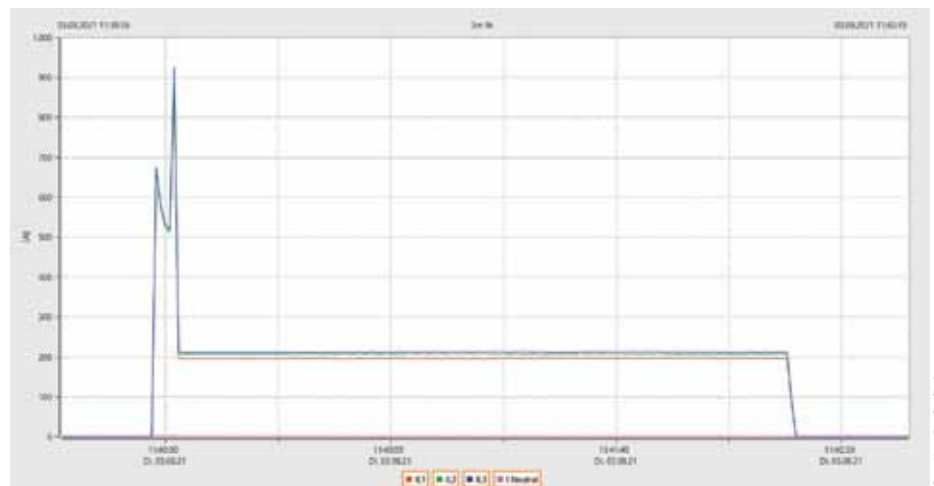
Wenn die Bemessungsdrehzahl erreicht ist, wird von Stern auf Dreieck umgeschaltet. Diese Umschaltung ist mit einer Umschaltspitze verbunden, die wesentlich höhere Werte des Stromes und der Leistungen hervorruft als anfangs in Sternschaltung (siehe die Motoranlauf-Aufzeichnung, Bild 2). Diese Umschaltspitze (deren Intensität und Dauer) muss besonders beurteilt werden, weil sie wichtigen Einfluss auf die Einstellung des Netzschutzes hat. Sie bestimmt das Überstromauslösungssystem des Leistungsschalters bzw. seiner S-Schutzfunktion zusammen mit den kleinsten Kurzschlussbelastungen mit.

Der Motor im Anlauf stellt ein resistiv-induktives elektrisches Betriebsmittel dar, de facto ein sehr stark induktives.

Da der Motor symmetrisch aufgebaut wird, kann er durch das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild im Mitsystem (Bild 3) modelliert werden.

In Bild 3 sind folgende physikalische Größen von Bedeutung:

- I_M Motoranlaufstrom (der zeitliche quadratische Mittelwert) in Ampere
- R_1 Statorresistenz in Ohm
- R'_2 Rotorresistenz, bezogen auf Stator in Ohm



Quelle: D. Sofic/ep

2 Motoranlauf-Aufzeichnung

- s Schlupf
- $X_{1\sigma}$ Statorstreureaktanz in Ohm
- $X'_{2\sigma}$ Rotorstreureaktanz, bezogen auf Stator in Ohm
- X_h Hauptreaktanz in Ohm
- U Sternspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) an Motoreingangsklemmen in Volt.

Unter Vernachlässigung der Hauptreaktanz lässt sich die Motorimpedanz wie folgt darstellen:

$$Z_{Mk} = \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right) + j \cdot (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) \right] \cdot e^{j \cdot \text{atan} \left(\frac{X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}}{R_1 + \frac{R'_2}{s}} \right)}$$

Sie wird als Eingangsimpedanz im Stillstand definiert und beim Motoranlauf wirksam.

- Z_{Mk} komplexe Motorimpedanz in Ohm
- $X_h = 0$ Hauptreaktanz vernachlässigt
- s = 1 Stillstand des Motors

Auf Grund seines symmetrischen Aufbaus bezieht der Motor aus dem Netz dieselben Beträge der Betriebsströme und ruft somit auf allen drei Außenleitern gleiche Spannungsfälle hervor.

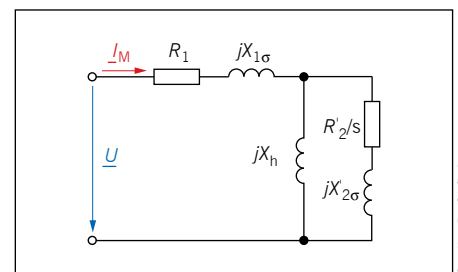
Die Spannungs-Strom-Leistungs-Verhältnisse sind im Zeigerdiagramm des Motors im Anlauf (Bild 4) präsentiert.

$$R_M = R_1 + \frac{R'_2}{s}$$

$$X_M = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$$

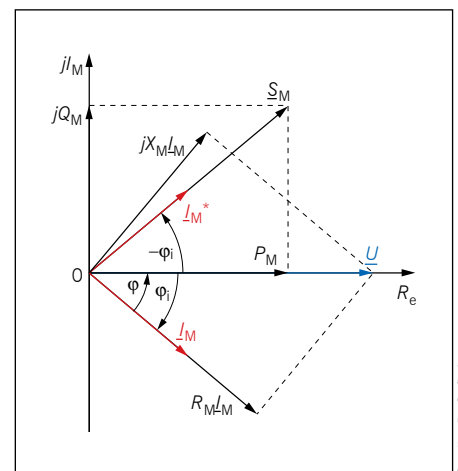
In dem Bild 4 sind folgende physikalische Größen von Bedeutung:

- I_M Motoranlaufstrom (der zeitliche quadratische Mittelwert) in Ampere
- U Sternspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) an Motoreingangsklemmen in Volt



Quelle: D. Sofic/ep

3 Einphasiges Ersatzschaltbild des Motors



Quelle: D. Sofic/ep

4 Zeigerdiagramm des Motors im Anlauf

- R_M Motorresistenz in Ohm
- X_M Motorreaktanz in Ohm
- P_M Motorwirkleistung in Watt
- Q_M Motorverschiebungsblindleistung in VAR (Volt Ampere reaktiv)
- S_M Motorscheinleistung in VA (Volt Ampere)
- ϕ_1 Nullphasenwinkel des Motoranlaufstromes in Grad/Radian
- ϕ Phasenverschiebungswinkel in Grad/Radian

Sowohl für das Ersatzschaltbild als auch das Zeigerdiagramm wurde das Verbraucherzählpfeilsystem verwendet.

Als Referenzgröße wurde der Zeiger der Netzspannung an den Motoreinspeiseklemmen gewählt und willkürlich in die positive Abszisse der Gaußschen (Gauß war ein bekannter deutscher Mathematiker) komplexen Zahlenebene gesetzt.

Der imaginäre Anteil des Motoranlaufstromes hat dabei negatives Vorzeichen und der Motor weist positive Wirkleistung und positive Verschiebungsblindleistung auf.

Es sind auch andere Betrachtungsweisen möglich, z. B. den Motoranlaufstrom als Bezugsgröße zu nehmen. Dann ist die Lage des Spannungszeigers gleichzeitig die des Zeigers der Scheinleistung sowie die des Phasenverschiebungswinkels φ . Der Phasenverschiebungswinkel φ ist der Winkel zwischen Stromzeiger und Spannungszeiger, gerichtet vom Strom- zum Spannungszeiger im Motoranlauf.

Planung und Auswahl des Anschlusspunktes des Motors

Bei der Planung bzw. der Wahl des Anschlusspunktes des Motors soll die Netzkurzschlusswechselstromleistung ausreichend groß sein bzw. die Netzkurzschlussimpedanz wesentlich kleiner als die Motorimpedanz sein. Ist das nicht der Fall, bricht die Statorklemmenspannung stark ein.

Am Anschlusspunkt des Motors in einem Verbrauchernetz ruft der Motoranlaufstrom bei der Zuschaltung einen Spannungsfall an der Netzkurzschlussimpedanz hervor. Dieser Spannungsfall beeinflusst alle an diesem Anschlusspunkt angeschlossene Verbraucher. Bei der Untersuchung des Spannungsfalls soll die minimale Kurzschlusswechselstromleistung berücksichtigt werden.

Die minimale Kurzschlusswechselstromleistung (bzw. die maximale Netzkurzschlussimpedanz) wird generell für alle Netzurückwirkungsuntersuchungen herangezogen.

Es ist zu beachten, dass sich diese minimale Kurzschlusswechselstromleistung von der nach der VDE 0102 ermittelten minimalen Kurzschlusswechselstromleistung unterscheidet.

Elektrische Eigenschaften des Netzes sind an jeder seiner Stelle durch die komplexe Kurzschlusswechselstromleistung, die komplexe Spannung und die komplexe Netzkurzschlussimpedanz bestimmt bzw. beschrieben.

Die Beurteilung des Spannungsfalls am Anschlusspunkt des Motors beim Anlauf klärt Bild 5 (Zeigerdiagramm zur Spannungsfalluntersuchung bei Motoranlauf).

Für die praktische Beurteilung des Spannungsfalls reicht in der Regel nur der Längsspannungsfall aus.

In Bild 5 sind folgende physikalische Größen von Bedeutung:

- U_1 Sternspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) am Anschlusspunkt vor dem Motoranlauf in Volt
- U_2 Sternspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) am Anschlusspunkt bei dem Motoranlauf in Volt
- I_M Motoranlaufstrom (der zeitliche quadratische Mittelwert) in Ampere
- R_k Realteil der Netzkurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt in Ohm
- X_k Imaginärteil der Netzkurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt in Ohm
- Z_k Betrag der Netzkurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt in Ohm
- φ_k Argument der Netzkurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt in Grad/Radian
- φ Phasenverschiebungswinkel in Grad/Radian

Entsprechend Bild 5 gelten näherungsweise folgende Gleichungen:

$$U_1 - U_2 = R_k \cdot I_M \cdot \cos\varphi + X_k \cdot I_M \cdot \sin\varphi$$

$$\cos(\varphi_k - \varphi) = \frac{R_k \cdot I_M \cdot \cos\varphi + X_k \cdot I_M \cdot \sin\varphi}{Z_k \cdot I_M}$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (U_1 - U_2)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (R_k \cdot I_M \cdot \cos\varphi + X_k \cdot I_M \cdot \sin\varphi)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_M \cdot (R_k \cdot \cos\varphi + X_k \cdot \sin\varphi)$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_M \cdot (R_k \cdot \cos\varphi + X_k \cdot \sin\varphi)}{U_n^2}$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{S_M \cdot (R_k \cdot \cos\varphi + X_k \cdot \sin\varphi)}{U_n^2}$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{S_M}{U_n^2} \cdot \frac{(R_k \cdot I_M \cdot \cos\varphi + X_k \cdot I_M \cdot \sin\varphi)}{Z_k \cdot I_M} \cdot Z_k$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{S_M}{U_n^2} \cdot \cos(\varphi_k - \varphi) \cdot Z_k$$

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{S_M}{S_k} \cdot \cos(\varphi_k - \varphi)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n}$$

Der Phasenverschiebungswinkel in Bild 5 entspricht dem Argument der komplexen Motorimpedanz im Anlauf.

ΔU absoluter verketteter Spannungsfall (der zeitliche quadratische Mittelwert) beim Motoranlauf in Volt,

Δu relativer verketteter Spannungsfall beim Motoranlauf,

S_k Betrag der Netzkurzschlusswechselstromleistung am Anschlusspunkt in VA (Volt Ampere),

S_M Betrag der Scheinleistung des Motors im Anlauf in VA (Volt Ampere)

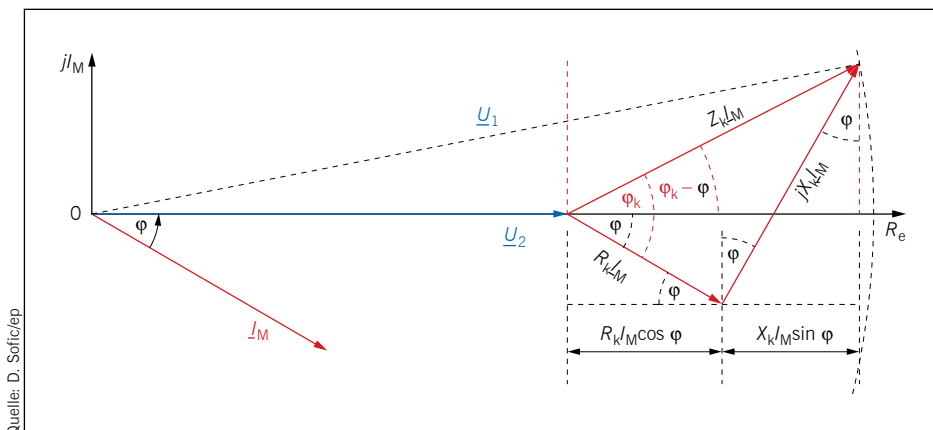
U_n Netznominalspannung als Außenleiterspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) von 400 V wird in der Regel als Bezugsspannung angenommen, um den relativen Spannungsfall zu ermitteln

Die Höhe des Spannungsfalls am Anschlusspunkt des Motors beim Anlauf wird von der Motoranlaufscheinleistung, der Netzkurzschlusswechselstromleistung, dem Argument der komplexen Netzkurzschlussimpedanz und dem Argument der komplexen Motorimpedanz im Anlauf bestimmt und ist am größten, wenn die beiden Argumente gleich sind.

Transiente Änderung der Generatorspannung (Motoranlauf)

Zunächst müssen einige elektrische Planungsmerkmale für einen Synchrongenerator hinsichtlich der zu versorgenden Sprinkleranlage berücksichtigt werden.

Die Motoren mit Direkt- und Stern-Dreieck-Anlauf können bei nicht adäquater Auslegung des Notstromaggregates einen beachtlichen Spannungseinbruch der Generatorspannung



5 Zeigerdiagramm zur Spannungsfalluntersuchung beim Motoranlauf

beim Anlauf hervorrufen. Der Synchrongenerator kann wegen seines symmetrischen Aufbaues ebenso durch das einphasige Ersatzschaltbild im Mitsystem dargestellt werden. Für die praktische Abschätzung der Generatorspannungsänderung beim Motoranlauf werden das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild beim Motoranlauf (Bild 6) sowie das vereinfachte Zeigerdiagramm des Synchrongenerators im Motoranlauf (Bild 7) dargestellt.

Bild 6 ist so zu verstehen, als ob der Motor im Anlauf direkt an den Generatorausgangsklemmen angeschlossen wäre. So kann die Spannungsänderung annähernd ermittelt werden. In Bild 6 ist der Vollpolsynchrongenerator (Turbogenerator) dargestellt. Für die Stromerzeugungsaggregate kommt aber der Schenkelpolsynchrongenerator zum Einsatz. Aufgrund des Unterschieds in der Polradform hat der Schenkelpolsynchrongenerator ein anderes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm.

Für die praktische Abschätzung kann dieser Unterschied aber vernachlässigt werden. Der in Bild 7 nachgebildete Winkel zwischen U_{rG} und I_M unterscheidet sich von dem Winkel zwischen der Spannung an den Motoreingangsklemmen und I_M . Das ist deswegen, weil U_{rG} und die Spannung an den Motoreingangsklemmen nicht gleiche Nullphasenwinkel haben und zueinander etwas phasenverschoben sind.

Trotzdem kann für die praktische Abschätzung in der Planungsphase auch dieser Unterschied vernachlässigt werden.

Sowohl für das Ersatzschaltbild als auch das Zeigerdiagramm wurde diesmal das Erzeugerzählpfeilsystem verwendet.

In dem Zeigerdiagramm ist der Synchrongenerator im übererregten Zustand dargestellt, in dem er dem Motor nicht nur die Wirkleistung, sondern auch die induktive Verschiebungsblindleistung liefert, die der Motor benötigt und die im Anlauf wesentlich größer als die Wirkleistung ist.

Der Synchrongenerator hat auch die Fähigkeit, die Verschiebungsblindleistung, wenn erforderlich, zu beziehen. Das lässt sich durch geeignete Einstellung seines Erregerstromes realisieren.

Es sei noch erwähnt, dass der Synchrongenerator seine abzugebende Wirkleistung erheblich reduzieren muss, wenn er ein stark kapazitives SV-Netz versorgen muss und dann im untererregten Zustand die induktive Verschiebungsblindleistung vom Netz aufnimmt.

Zur praktischen Abschätzung der Generatorspannungsänderung im Motoranlauf kann

auch hierbei nur der Längsspannungsfall betrachtet werden.

Bild 7 kann näherungsweise folgende Gleichung entnommen werden:

$$U_p - U_{rG} = I_M \cdot (R_G \cdot \cos\varphi + X'_d \cdot \sin\varphi)$$

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_M \cdot (R_G \cdot \cos\varphi + X'_d \cdot \sin\varphi)}{U_n}$$

In den Bildern 6 und 7 sind folgende physikalische Größen von Bedeutung:

ΔU relative verkettete Spannungsänderung an den Generatorausgangsklemmen beim Motoranlauf,

U_n Netznominalspannung als Außenleiterspannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) von 400 V wird in der Regel als Bezugsspannung angenommen, um den relativen Spannungsfall zu ermitteln,

U_{rG} Bemessungsspannung als Außenleiter-Neutralleiter-Spannung (der zeitliche quadratische Mittelwert) des Generators an seinen Ausgangsklemmen in Volt,

U_p Polradspannung des Generators in Volt, I_M Motoranlaufstrom (der zeitliche quadratische Mittelwert) in Ampere,

R_G Resistanz des Generators in Ohm,

X'_d transiente Reaktanz des Generators in Ohm,

θ Polradwinkel des Generators in Grad/Radian,

φ Phasenverschiebungswinkel in Grad/Radian, entspricht dem Argument der komplexen Motorimpedanz im Anlauf

Die herkömmlichen Werte der Phasenverschiebungswinkel liegen zwischen etwa 60° und 70°.

Die dynamische Spannungsänderung/der dynamische Spannungsfall an den Ausgangsklemmen des Synchrongenerators beim Motoranlauf wird durch den Motoranlaufstrom, die Resistanz sowie die transiente Reaktanz des Synchrongenerators bestimmt, wobei

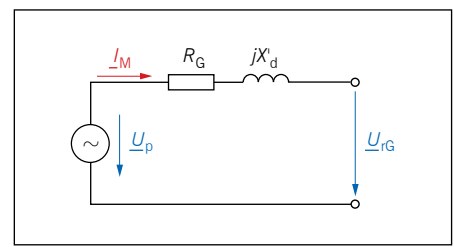
$R_G \ll X'_d$ gilt. Daraus schließt man, dass induktive Verbraucher wesentlich größere Spannungsänderungen/Spannungsfälle der Generatorspannung als resistive Verbraucher verursachen.

Bei Kurzschluss speist der Motor ins Netz zurück

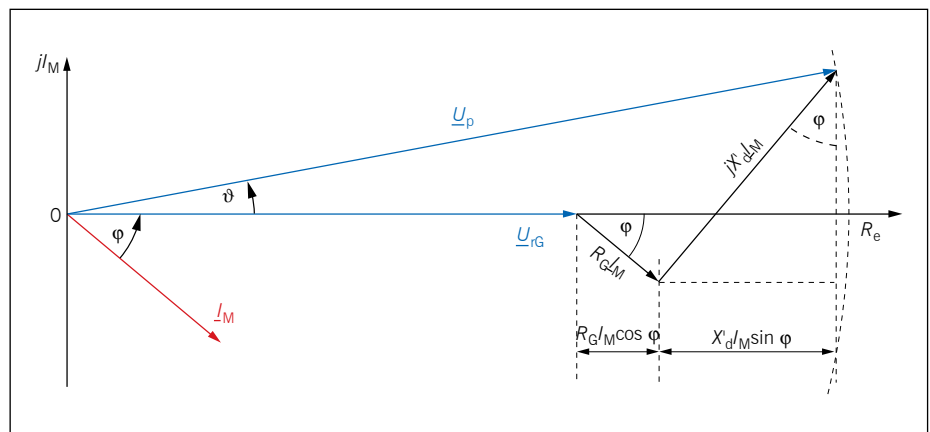
Auf Grund der Bemessungswirkleistung des Motors von 160 kW empfiehlt es sich, zu überprüfen, ob der Anteil des Motors bei Kurzschluss von Relevanz ist. In der Regel beteiligen sich die MS-Motoren bei Kurzschluss auf Grund ihrer großen Leistung immer, wenn sie nicht zur Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern ausgestattet sind.

In der NS-Ebene ist das der Fall nur bei Motoren großer Leistungen.

Ein Motor (Drehstrom-Asynchronmotor) wird bei Kurzschluss nur bei der Berechnung der größten Kurzschlussströme und nur dann berücksichtigt, wenn sein Bemessungsstrom größer als 1 % des Anfangskurzschlussstromes ohne den Motor ist bzw. sein Beitrag zum Anfangskurzschlusswechselstrom > 5 % ohne den Motor ist. Der Motor liefert seinen Beitrag zum Anfangskurzschlusswechselstrom, zum Stoßkurzschlussstrom, zum Ausschaltwechselstrom und nur bei unsymmetrischen Kurzschlüssen auch zum Dauerkurzschlusswechselstrom. Während bei dem Synchrongenerator der Anfangskurzschlusswechselstrom auf den Dauerkurzschluss-



6 Ersatzschaltbild eines Synchrongenerators



7 Zeigerdiagramm des Synchrongenerators beim Motoranlauf

Geräteprüfung: Neue Normen & Anforderungen

wechselstrom abklingt, klingt der Anfangskurzschlusswechselstrom bei dem Drehstrom-Asynchronmotor auf Grund der fehlenden Erregung auf null ab.

Es ist zu beachten, dass in allen Zeigerdiagrammen (Bilder 4, 5 und 7) die Beträge der Zeiger nur qualitativen (nicht quantitativen) Charakter haben.

Fazit

Durch geeignete Auswahl des Anschlusspunktes der Sprinkleranlage und die Abstimmung ihrer Leistung auf die Leistung des Stromerzeugungsaggregates sollen Spannungseinbrüche beim Anlauf der Sprinkleranlage vermieden werden.

Der Motoranlaufstrom soll ebenso nicht in der Nähe des kleinsten Kurzschlussstromes liegen. Lässt sich das nicht vermeiden, dann sollen Maßnahmen zur Realisation der selektiven Zeitstaffelung der in Reihe liegenden Leistungsschalter rechtzeitig getroffen werden.

Damit anfangs genannte oder ähnliche Planungsfehler nicht passieren, empfiehlt es sich, sich mit dem physikalischen Hintergrund, der Theorie, der Modellierung und der Anwendung der elektrischen Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik bzw. mit den Kennwerten und deren Berechnung für alle elektrischen Betriebsmittel vertraut zu machen, wenn man vorhat, Netzberechnungen zu erstellen.

Es empfiehlt sich, zumindest gelegentlich, um „in Form“ zu bleiben, die Berechnung der Kennwerte der elektrischen Betriebsmittel eines elektrischen Versorgungsnetzes von Hand zu tätigen.

Mit diesen Kenntnissen kann man dann das Verhalten des elektrischen Versorgungsnetzes im ungestörten eingeschwungenen stationären Zustand durch die Lastflussberechnung bzw. bei Kurzschlüssen durch die Kurzschlussstromberechnung sowie die Wirkung der höherfrequenten Anteile durch die Oberschwingungsberechnung untersuchen, verstehen und beurteilen.

Und die verfügbare leistungsfähige Rechen-technik? Dem vielbeschäftigten Elektroingenieur stehen in der gegenwertigen Zeit sehr leistungsfähige Netzberechnungsprogramme zur Erleichterung seiner Planungstätigkeit zur Verfügung. Aber selbst die beste/leistungsfähigste Netzberechnungssoftware ist nur ein Hilfsmittel und kann ihm das Denken und vor allem die Fachkompetenz und die mit dem Denken bzw. der Fachkompetenz verbundene Verantwortung nicht abnehmen. ■



März 2022,
10., stark über-
arbeitete Auflage
2022, 39,80 €,
Bestell-Nr.
3-341-01651-0,
Autor: K. Bödeker,
M. Lochthofen
Im Online-Shop auch
als E-Book erhältlich.

10. Auflage

Ein Muss für jede Elektrofachkraft

Die Neuauflage dieses renommierten Klassikers liefert einen zusammenhängenden und aktuellen Überblick zum Thema Geräteprüfung.

Beleuchtet werden die zwei neuen Normen DIN EN 50678 und DIN EN 50699, die aus der Trennung der alten VDE 0701-0702 hervorgegangen sind, und die damit verbundenen Herausforderungen:

- Internationale Harmonisierung: neue Normen auch in anderen europäischen Ländern anwendbar
- Neue Messung: Prüfung des Ableitstroms von isolierten Eingängen
- BetrSichV, TRBS und DGUV: umfassende Prüfung und ausführliche Dokumentation erforderlich



**Jetzt
bestellen!**

Bild: stock.adobe.com/LuckyStep