

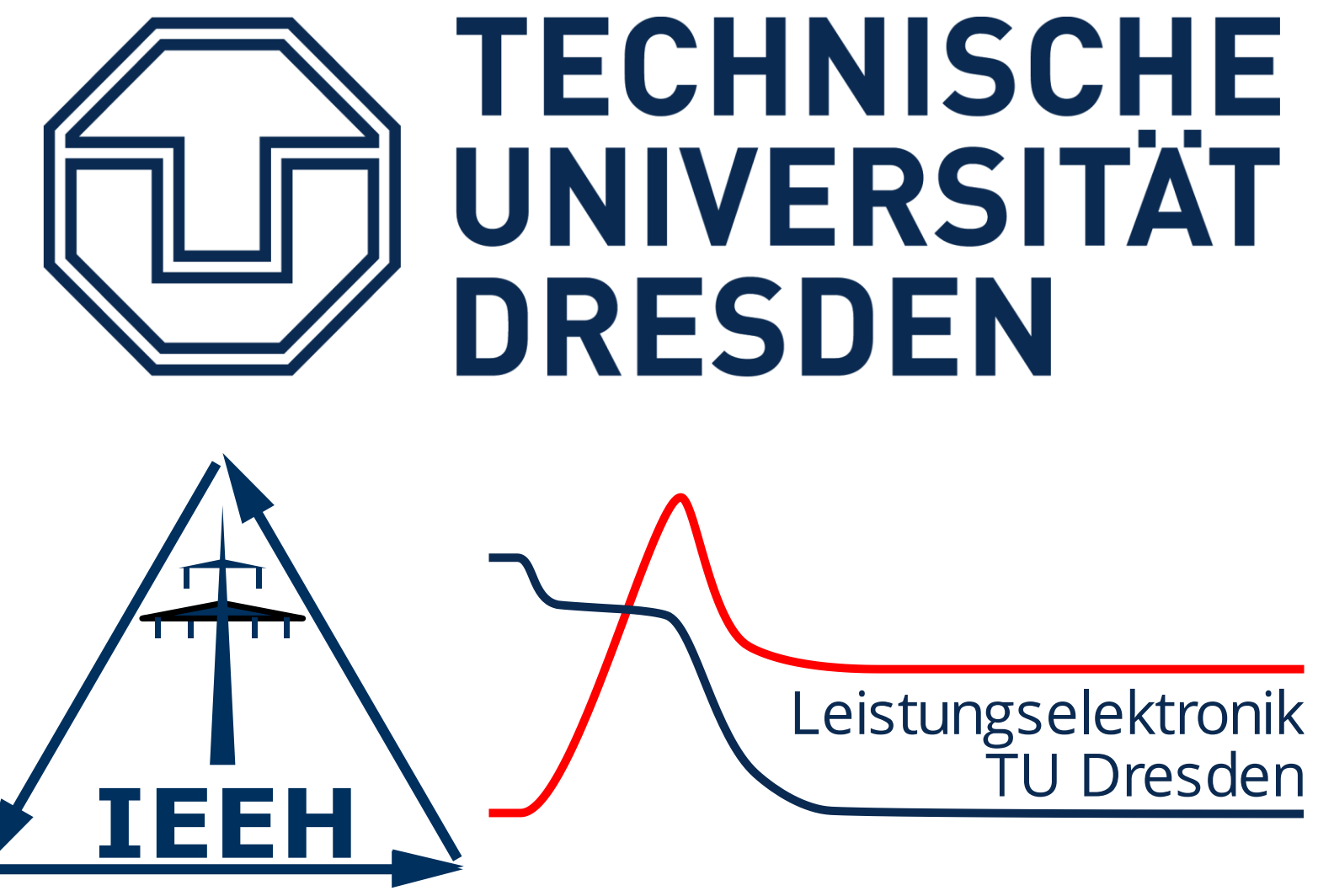
## Selektive Fehlerklärung durch angepasste Stromrichter-Strombegrenzung

Carlo Liebermann\*, Lasse Gnärig\*\*, Ricardo Herrmann\*  
Robin Weiß\*\*, Andreas Hoffmann\*\*, Steffen Bernet\*\*

\* Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)  
Professur für Elektroenergieversorgung

\*\* Elektrotechnisches Institut (ETI)  
Professur für Leistungselektronik

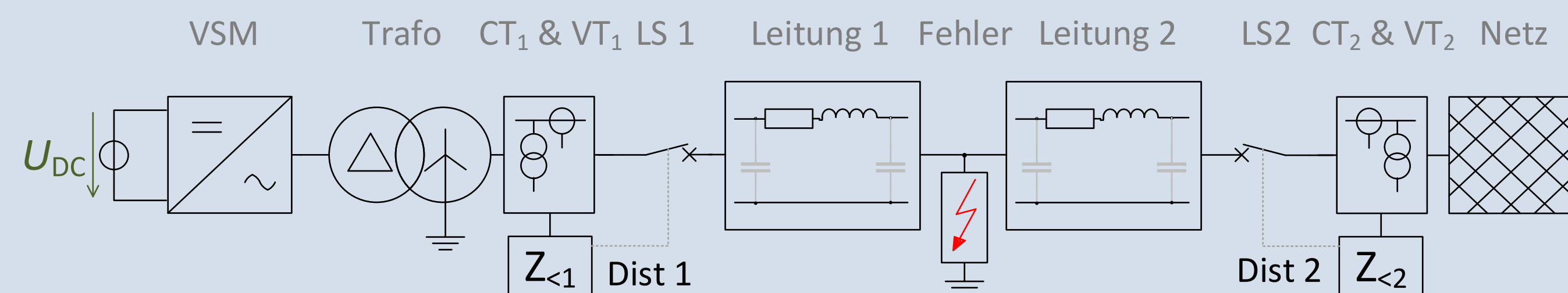
Projektpartner:   **skeleton** **RWE**



### Motivation

- Wandel des elektrischen Energiesystems führt zu stromrichterdominierter Einspeisung
- Netzstabilität und Versorgungszuverlässigkeit muss erhalten bleiben
- Ansatz: virtuelle Synchronmaschine (VSM) mit angepasster netzbildender Regelung
- Verhalten im Fehlerfall weicht von Synchronmaschine ab
  - > Maximaler **Kurzschlussstrom ist deutlich geringer** und wird aktiv begrenzt
  - > Ströme und Spannungen **weichen von einem sinusförmigen Verlauf ab**

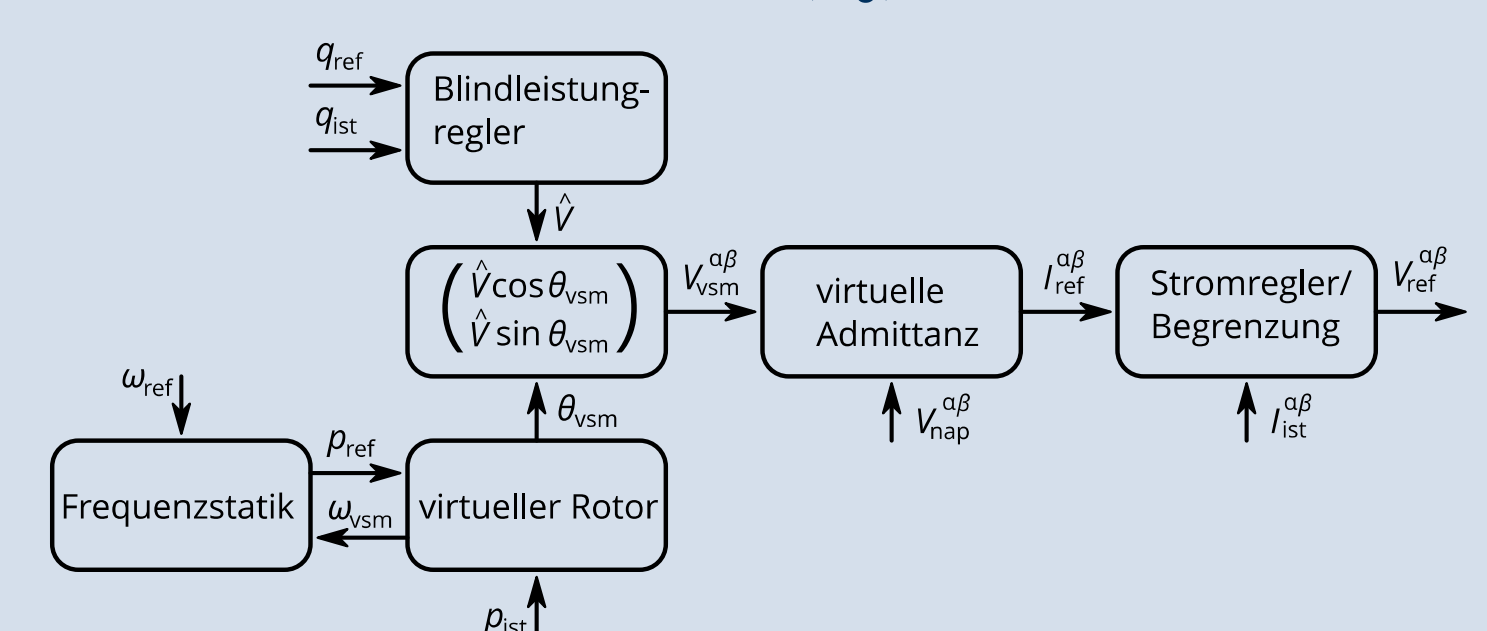
### Modellierung



#### Virtuelle Synchronmaschine (VSM)

- Virtueller Rotor bestimmt Spannungswinkel und Trägheit
- Blindleistungsregler stellt Spannungsamplitude ein
- Virtuelle Impedanz setzt Spannungssollwert in Stromsollwert um
- Stromregler ermöglicht und begrenzt den Strom
- 3-Phasen-Signale werden auf die  $\alpha$ - $\beta$ -Ebene projiziert:

$$x^{\alpha\beta} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix}$$



#### Distanzrelais (Dist)

- Ideales Übertragungsverhalten der Wandler
- Samplefrequenz  $f_{\text{Sample}} = 1 \text{ kHz}$
- Vernachlässigung der Vorverarbeitung

#### Algorithmen zur Impedanzberechnung [1]

| Lösen stationärer Gleichungen                                                                                                   | Lösen von Differentialgleichungen                                                                                                          | Digitale Filterung zur Zeigerberechnung                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>× Nicht verwendet</li> <li>- Lobos T2</li> <li>- Mann/Morrison</li> <li>- ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Werden verwendet</li> <li>- Lobos A3/A4 [2]</li> <li>- McInnes/Morrison</li> <li>- ...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Phadke/Ibrahim [3]</li> <li>- Horton</li> <li>- Carr/Jackson</li> <li>- ...</li> </ul> |

| Algorithmus           | Lobos A3               | Phadke/Ibrahim         |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Datenfenster          | 2 ms (schnell)         | 20 ms (langsamer)      |
| Abklingender DC-Strom | Notwendig              | Verfälschen Berechnung |
| Harmonische           | Verfälschen Berechnung | Resistent              |

### Bewertung der Reaktanzberechnung

#### Bewertung der Reaktanzberechnung (Annahme einer Normalverteilung)

##### 1. Vergleich des Erwartungswerts $\mu$ mit dem Referenz

$$\frac{\Delta\mu}{\%} = 100 \cdot \frac{\mu_{\text{Algo}} - X_{\text{Ref}}}{X_{\text{Ref}}} \quad \text{mit} \quad \mu_{\text{Algo}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{\text{Algo},k} \quad \rightarrow \text{Bewertung der stationären Abweichung}$$

##### 2. Berechnung der relativen Streuung durch Varianzkoeffizient $v$

$$\frac{v}{\%} = 100 \cdot \frac{\sigma}{\mu_{\text{Algo}}} \quad \text{mit} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_{\text{Algo},k} - \mu_{\text{Algo}})^2} \quad \rightarrow \text{Bewertung der Streuung}$$

| Algorithmus                       | Strombegrenzung | Konventionell                            | Verbessert                             |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| Phadke/Ibrahim (Digitales Filter) |                 | $\Delta\mu = -2,53 \%$<br>$v = 1,55 \%$  | $\Delta\mu = 0,38 \%$<br>$v = 0,67 \%$ |
| Lobos A3 (DGL-lösend)             |                 | $\Delta\mu = 22,18 \%$<br>$v = 430,5 \%$ | $\Delta\mu = 0,54 \%$<br>$v = 3,95 \%$ |

Korrekte Arbeitsweise ist:

Möglich

Für DGL-lösende Algorithmen nur bei verbesserter Strombegrenzung

Gefährdet

Gefahr von Über- bzw. Unterfunktion bei konventioneller Strombegrenzung

### Literatur

- NELLES, D., OPPERSKALSKI, H.: Digitaler Distanzschutz: Verhalten der Algorithmen bei nichtidealen Eingangssignalen. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, 1991
- KOGLIN, H.-J., LOBOS, T.: Distanzschutz mit Microrechnern, etzArchiv, Band 3, Heft 6, 1981, S. 196-177
- HLIBKA, T., PHADKE, A.-G., IBRAHIM, M.: A digital computer system for EHV sub-stations: Analysis and field tests, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Band 95, Heft 1, 1976, S. 291-301
- LIEBERMANN, C., GNÄRIG, L., WEISS, R., HOFFMANN, A., ZHANG, Y., HERRMANN, R., SCHEGNER, P., BERNET, S.: Current Limiting of Virtual Synchronous Machines on Unbalanced Faults Considering Grid Protection, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2022, ISBN 978-3-8007-6013-8

### Forschungsfragen

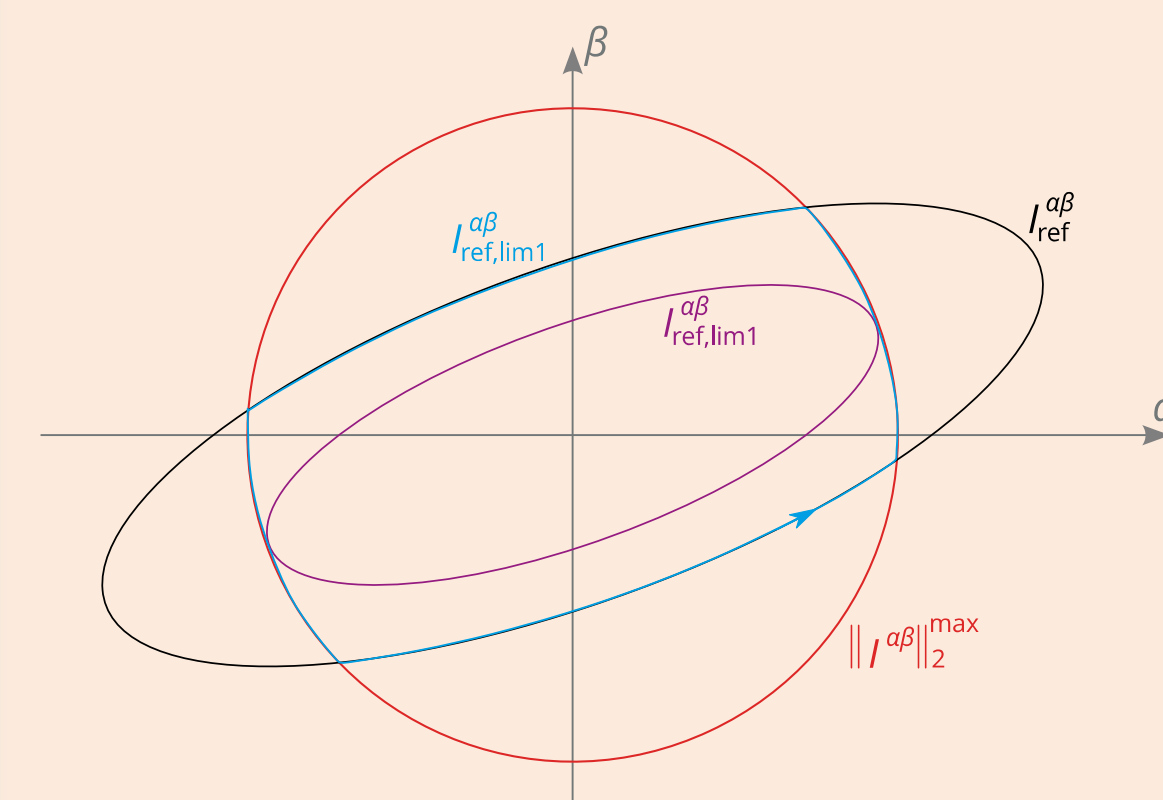
- Welchen Einfluss hat die Stromrichter-Regelung auf den Zeitverlauf von Strom und Spannung im Fehlerfall?
- Wie zuverlässig arbeiten die konventionellen Distanzschutzalgorithmen bei Speisung des Fehlers durch einen Stromrichter?
- Muss das Strombegrenzungsverhalten der Stromrichter angepasst werden, um einen zuverlässigen Betrieb der Schutztechnik zu gewährleisten?

### Einfluss der VSM-Strombegrenzung

#### Konventionelle Strombegrenzung

- Begrenzung der Amplitude, wenn diese den maximalen Strom überschreitet:

$$i_{\text{ref,lim}}^{\alpha\beta} = i_{\text{ref}}^{\alpha\beta} \frac{I_{\text{max}}}{\|i_{\text{ref}}^{\alpha\beta}\|_2}$$

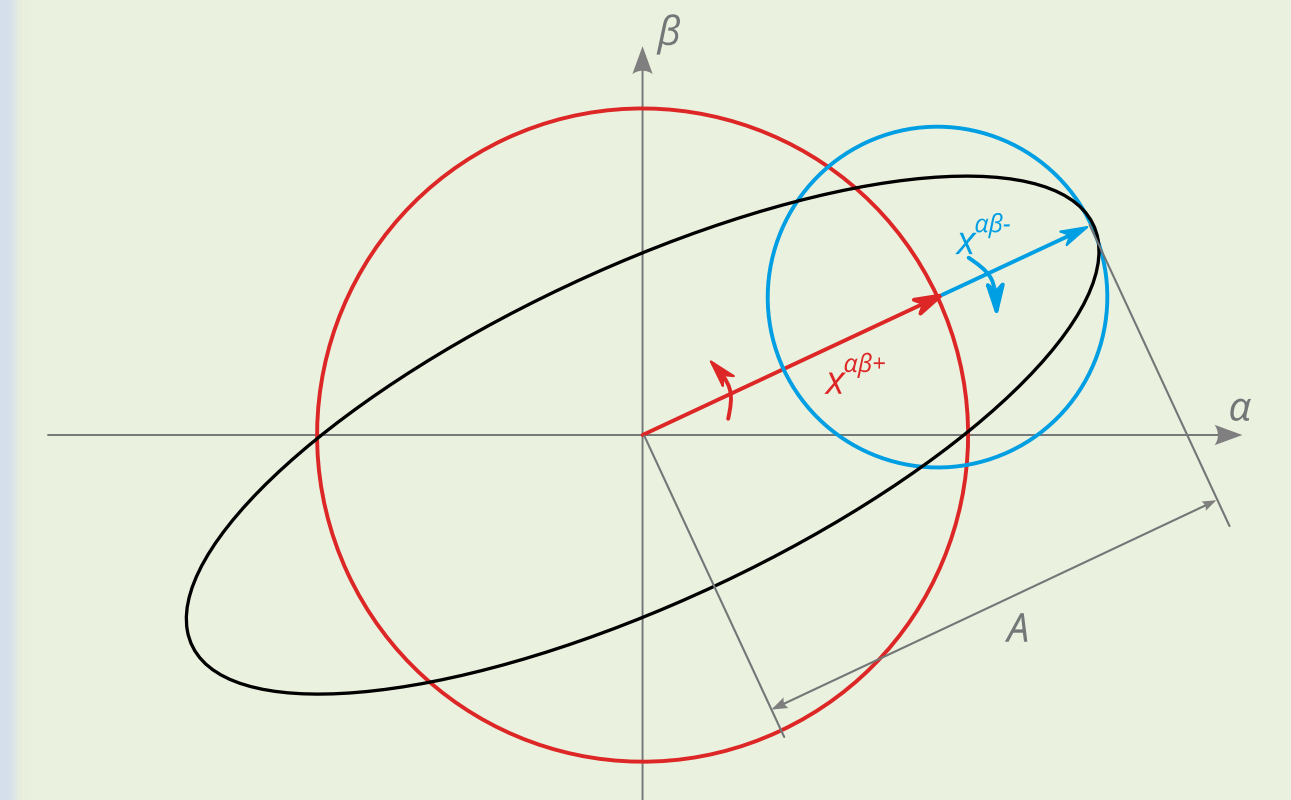


- Optimiert für symmetrische Signale

#### Verbesserte Strombegrenzung [4]

- Berücksichtigung des Gegensystems
- Begrenzung der max. Länge des Stromvektors:

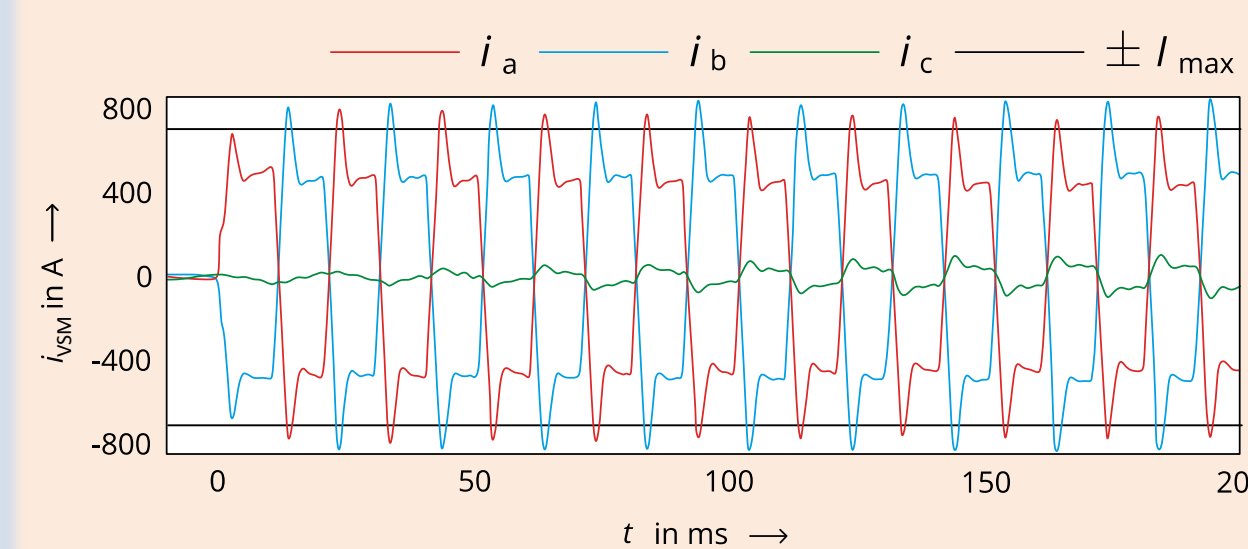
$$i_{\text{ref,lim}}^{\alpha\beta} = \begin{cases} i_{\text{ref}}^{\alpha\beta} & A \leq I_{\text{max}} \\ \frac{i_{\text{ref}}^{\alpha\beta}}{A} I_{\text{max}} & A > I_{\text{max}} \end{cases} \quad A = \sqrt{\|i_{\text{ref}}^{\alpha\beta+}\|_2^2 + \|i_{\text{ref}}^{\alpha\beta-}\|_2^2}$$



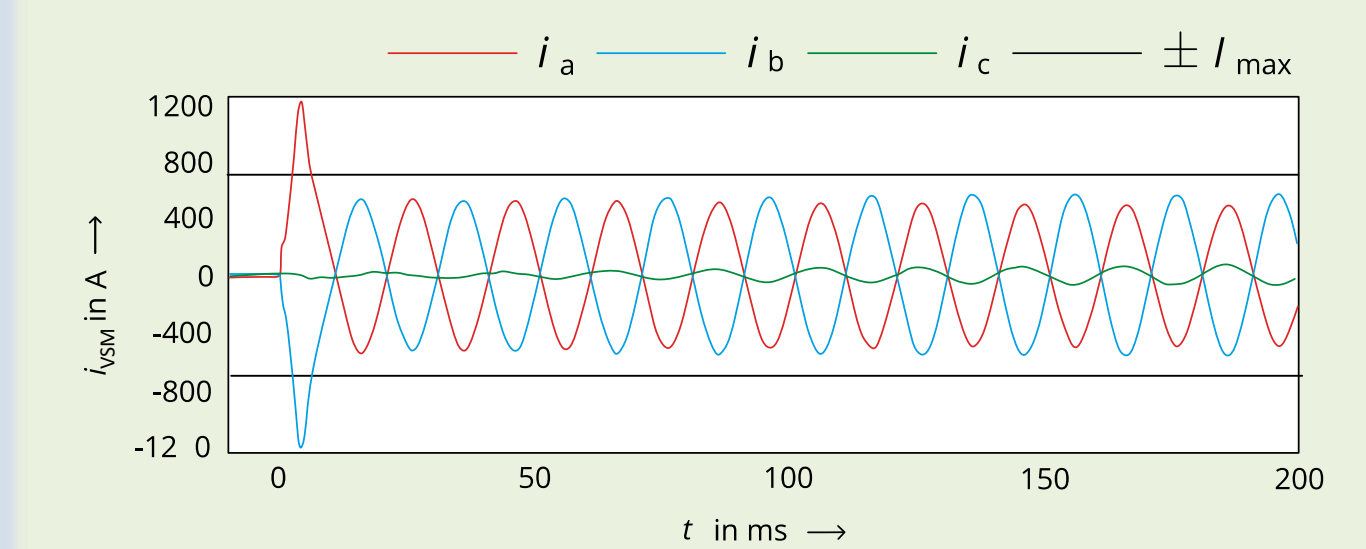
- Extraktion von Mit- und Gegensystemkomponenten

#### Auswirkungen auf den Kurzschlussstrom bei unsymmetrischen Fehlern

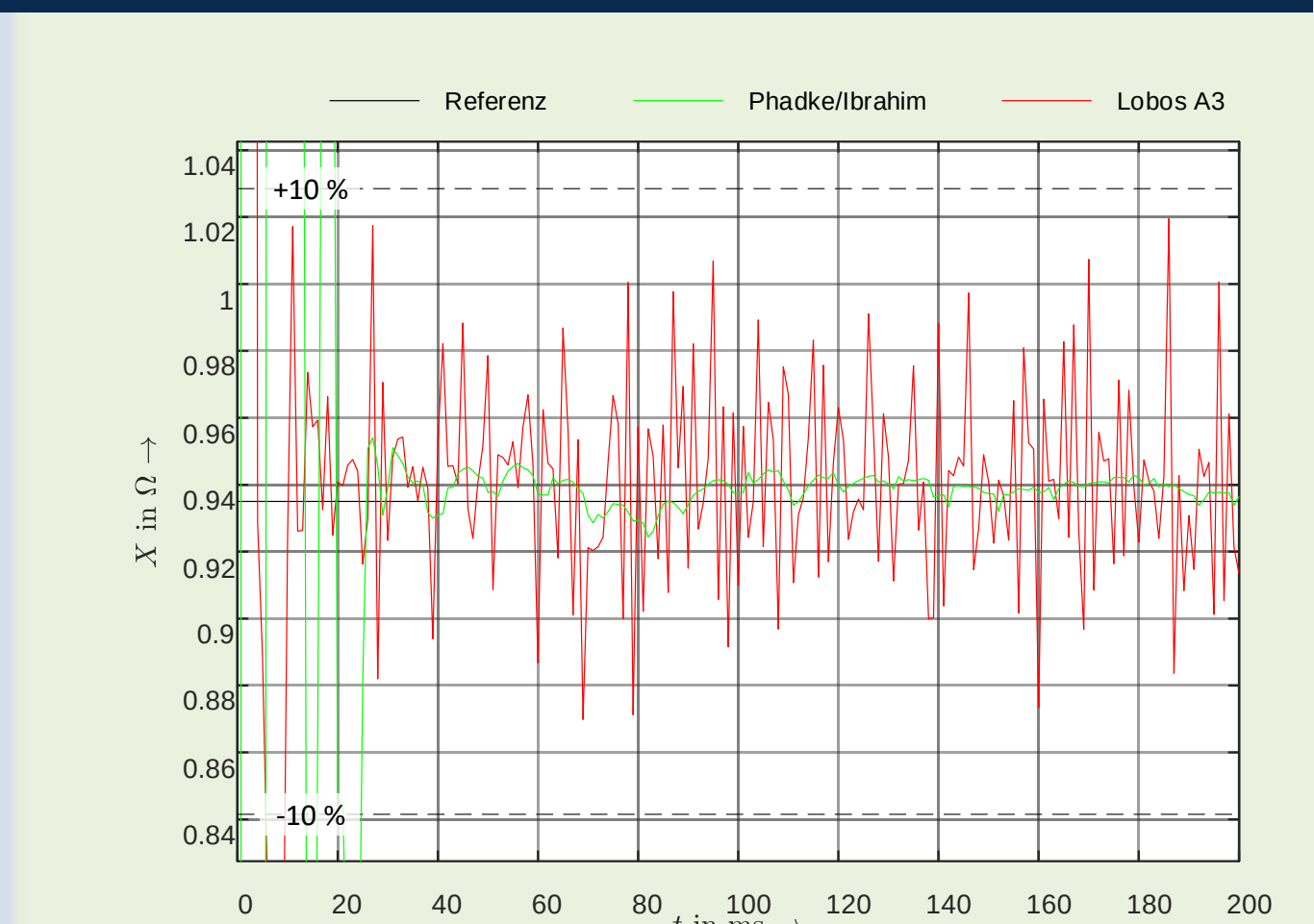
- Harmonische Verzerrungen im Zeitverlauf



- Nach kurzem Überspringen sinusförmig



#### Auswirkungen auf die Reaktanzberechnung



### Zusammenfassung

- Zwei konventionelle Netzschutzalgorithmen wurden in Abhängigkeit von einer konventionellen und einer verbesserten Strombegrenzungsmethode verglichen
- Konventionelle Strombegrenzung:**
  - Starke Schwingungen des Lobos A3 Algorithmus überschreiten die Toleranzgrenzen
    - Korrekte Arbeitsweise gefährdet
  - Reaktanzen des Phadke/Ibrahim-Algorithmus bleibt innerhalb des Toleranzbandes
- Verbesserte Strombegrenzung**
  - Qualitätsprobleme verschwinden
    - Korrekte Arbeitsweise ist mit beiden Algorithmen möglich