



Ermittlung und Bewertung der Frequenz in Energieversorgungsnetzen

Auswirkungen netzseitiger Störeinflüsse

**Version 2
Juni 2022**



Inhalt

1 Motivation und Ziele	12
2 Angepasste Anforderungen	13
2.1 Definition von Normal- und Störbetrieb	13
2.2 Fehlerklärungszeit und ihre Bestandteile	15
2.3 Verhalten im Störbetrieb (Schutzverhalten)	15
2.3.1 Entkupplungsschutz	15
2.3.2 Automatische Letztmaßnahmen	16
2.4 Verhalten im kritischen Systemzustand (Regelverhalten)	16
3 Einflussfaktoren auf die Frequenz	18
3.1 Frequenz in der elektrischen Energietechnik	18
3.1.1 Allgemeine Betrachtungen zu Wechselspannungen und Drehstromsystemen	18
3.1.2 Wechselstromtechnik: zweiphasige Messung	19
3.1.3 Drehstromsystem: dreiphasige Messung	20
3.2 Digitale Messverfahren	20
3.2.1 Messung der Periodendauer	20
3.2.2 Frequenzmessung basierend auf Nulldurchgangserkennung	20
3.2.3 Frequenzmessung basierend auf Zeiger	21
3.2.4 Weitere Beispiele für verwendete Algorithmen für zweiphasige Messung	22
3.3 Ursachen für Störgrößen bei der Frequenzmessung	22
3.3.1 Nichtlineare Bauelemente im Netz	23
3.3.2 Magnetische und kapazitive Kopplungen	23
3.3.3 Lastsprünge	23
3.3.4 Erd- und Kurzschlüsse	24
3.3.5 Schaltvorgänge	24
3.3.6 Frequenzumrichter	24
3.4 Auswahl der Messgrößen	25
3.5 Messanforderungen und Maßnahmen gegen Störgrößen	25
4 Schutztechnische Anwendungen der Frequenzänderungsgeschwindigkeit	26
4.1 Einleitung und Definitionen	26
4.2 Messverfahren und Messalgorithmen	26
4.3 Anwendungen der ROCOF-Funktion	29
4.3.1 ROCOF-Anwendung für den adaptiven Unterfrequenzlastabwurf	29
4.3.2 Anwendung für Inselerkennung und gesteuerte Inselbildung	31
4.3.3 Grenzen der Anwendung	32
4.3.4 Typische Einstellwerte und Funktionsweisen	33
4.4 Prüfungen	36
5 Hinweis zur Prüfung mit Harmonischen	38
5.1 Grundlagen	38
5.1.1 Rotierender Zeiger und Phasenverschiebung der Grund- und Oberschwingung	38

5.1.2	Frequenzänderung	38
5.2	Festlegung der Oberschwingungsparameter	39
5.2.1	Genauigkeitsprüfung	39
5.2.2	Stabilitätsprüfung	40
6	Blockierung der Frequenzauslösung	42
7	Simulation eines Unterfrequenzschutzes bei Lastabwurf	43
7.1	Zielsetzung	43
7.2	Unterfrequenzschutz-Messprinzip	43
7.3	Modellbildung und Simulation	44
7.4	Verhalten mit synthetisch erzeugten Spannungsverläufen	44
7.5	Verhalten mit aufgezeichneten Stördaten aus verschiedenen Netzen	47
7.6	Verhalten mit Netzmodell-Messdaten	49
7.7	Algorithmus-Varianten für die Frequenzmessung	50
7.8	Schlussfolgerungen	51
8	Reale Frequenzverläufe	52
9	Empfehlungen zum Prüfen	57
9.1	Randbedingungen der Prüfung des Frequenzschutzes	57
9.1.1	Frequenzsprung oder quasistetige Frequenzänderung	57
9.1.2	Frequenzgradient	57
9.1.3	Einfluss von Störgrößen	58
9.1.4	Synthese von Spannungsverläufen ohne Momentanwertsprung nach Frequenzwechsel	59
9.1.5	Wiederholung von Prüfungen	61
9.1.6	Sprünge des Frequenzgradienten	61
9.1.7	Pulsrampen	61
9.2	Empfehlung zur Prüfung verschiedener Frequenzschutz- und ROCOF-Funktionen	61
9.2.1	Inbetriebnahme- und Wiederholungsprüfungen	61
9.2.2	Applikationsprüfungen des Unterfrequenz- und Überfrequenzschutz	61
9.2.3	Zusätzliche Wirkleistungsbestimmung	62
9.2.4	ROCOF-Funktion	62
9.2.5	Zusammengesetzte Funktionen	62
9.3	Störgrößen	62
9.3.1	Phasensprung	62
9.3.2	Amplitudensprung	63
9.3.3	Nullspannungen	63
9.3.4	Harmonische und zwischenharmonische Schwingungen	63
9.4	Empfehlung zur Applikationsprüfung (Akzeptanzprüfung) des Unterfrequenzschutzes für den Lastabwurf	63
9.4.1	Ziele der Applikationsprüfung	63
9.4.2	Abgrenzung zu IEC 60255-181	64
9.4.3	Vorgaben zum Prüfablauf	64
9.4.4	Festlegung der Prüfanforderungen	64

9.4.5	Blockade bei Unterspannung	65
9.4.6	Genauigkeit und Auslösezeit ohne Störgrößen.....	66
9.4.7	Genauigkeit und Auslösezeit bei einem Phasensprung	66
9.4.8	Genauigkeit und Auslösezeit bei einem Spannungssprung	67
9.4.9	Genauigkeit und Auslösezeit bei Harmonischen und Zwischenharmonischen....	68
9.4.10	Genauigkeit und Auslösezeit bei überlagerter Nullspannung.....	70
9.4.11	Wiederholungs- und Inbetriebnahmeprüfungen.....	71
9.4.12	Übersicht und Varianten.....	71
9.4.13	Anmerkungen.....	71
10	Anforderungen an den Leistungsschalter	73
11	Frequenzmessung Stromrichter.....	75
11.1	Stromrichter und Frequenzmessung	75
11.2	Einfache PLL zur Frequenzermittlung	75
11.3	PLL zur Frequenzermittlung bei unsymmetrischer Spannung.....	75
12	Ausblick	78
13	Literaturverzeichnis	80

Bildverzeichnis

Bild 1	Notwendige Funktionsblöcke der Frequenzmessung	12
Bild 2	Definition der einzelnen Bestandteile einer Fehlerklärungszeit.....	14
Bild 3	Darstellung der harmonischen Sinusschwingung als Projektion des rotierenden komplexen Zeigers U	18
Bild 4	Darstellung der harmonischen Schwingung als rotierender komplexer Zeiger.....	19
Bild 5	Beispiel der Darstellung eines stationären hochohmigen Erdschlusses in Raumzeiger-Darstellung	20
Bild 6	Frequenzmessung basierend auf Nulldurchgangserkennung	21
Bild 7	Lineare Approximation zur Berechnung des Nulldurchgangs	21
Bild 8	Ergebnis der DFT: Zeigerdarstellung der Spektrallinie für die Frequenz f_0	22
Bild 9	Bild aus der IEC 60255-181 [3]	23
Bild 10	Amplitudensprung	23
Bild 11	Phasensprung.....	23
Bild 12	Erdschluss in einem gelöschten Netz: Leiter-Erde-Spannungen eines Erdschlusses und verkettete Spannung u_{12} eines Erdschlusses; mehrfache Nulldurchgänge können auftreten	24
Bild 13	Entfernter Kurzschluss [5]	24
Bild 14	Spannung mit abklingendem Gleichanteil	24
Bild 15	Rückwirkung Frequenzumrichter [5].....	25
Bild 16	Prinzip der ROCOF-Bestimmung	27
Bild 17	Beispiel einer ROCOF-Funktion	27
Bild 18	Frequenzverlauf mit ROCOF Blockier- und Auslösevorgängen.....	28
Bild 19	Blockdiagramm zum Prinzip der Frequenzberechnung	29
Bild 20	Frequenz und df/dt -Verläufe bei einer 21 % Erzeugungsdefizit in einem 35 GW Verbundsystem mit UFLA [6]	30
Bild 21	Mögliche Grundstrukturen eines Unterfrequenzlastabwurfs mit ROCOF	30
Bild 22	Adaptiver Unterfrequenzlastabwurf (Beschleunigung der $f <$ -Stufe 1).....	31
Bild 23	Stabilisierung der ROCOF-Auslösekennlinie mit Frequenzabweichung	32
Bild 24	Dynamisches Modell der rotierenden Massen und Frequenzabhängigkeit der Lasten	34
Bild 25	Leistungsdefizit bei einer gegebenen ROCOF-Einstellung in Abhängigkeit der Ansprechverzögerung	34
Bild 26	Koordinierung der Ansprech- und Rückfallzeiten der Verknüpfung $f <$ & $ROCOF >$	35
Bild 27	Koordinierung der $f <$ & $ROCOF >$ Funktion mit dem Unterfrequenzschutz der Erzeugungseinheiten	35
Bild 28	Beispiel für adaptiven UFLA.....	36
Bild 29	Leiter-Erde-Spannungsverläufe; Grundschiwingung (50 Hz) überlagert mit 6 % fünfter und 5 % siebter Harmonischer	40
Bild 30	Leiter-Leiter-Spannungsverläufe, gemäß Bild 29	40
Bild 31	Leiter-Erde-Spannungsverläufe; Grundschiwingung (49,8 Hz) überlagert mit beispielhaft 20 % fünfter und 20 % siebter Harmonischer	41

Bild 32	Leiter-Leiter-Spannungsverläufe, gemäß Bild 31	41
Bild 33	Zeigerbasierter Algorithmus zur Frequenzmessung	43
Bild 34	Modell für einen beispielhaften Unterfrequenzschutz	44
Bild 35	Rampenförmiger Frequenz-Rückgang mit Auslösung bei Unterfrequenz	45
Bild 36	Rampenförmiger Frequenz-Rückgang ohne Auslösung bei Unterfrequenz	45
Bild 37	Amplitudensprung ohne Auslösung am Ende einer Frequenzrampe	46
Bild 38	Phasensprung mit Auslösung am Ende einer Frequenzrampe	46
Bild 39	Rampenförmiger Frequenz-Rückgang mit Oberschwingungen	47
Bild 40	Simulierte Frequenzmessung bei einer Störung im europäischen Verbundnetz am 10.01.2019	48
Bild 41	Simulierte Frequenzmessung beim Blackout in der Türkei vom 31. März 2015 [12]	48
Bild 42	Simulierte Frequenzmessung mit Stördaten eines realen Relais „f2“ bei Lastabwurf	49
Bild 43	Simulierte Frequenzmessung bei Lastabwurf für eine Netzmodell- Aufzeichnung	50
Bild 44	Algorithmus-Varianten für Frequenzmessung bei rampenförmigem Frequenz- Rückgang mit Oberschwingungen und Phasensprung	51
Bild 45	Frequenzverläufe von Großstörungen, „IT – 28.09.2003“ [13] und „DE – 04.11.2006“ [14]	53
Bild 46	Frequenzverläufe von Großstörungen, „TR – 31.03.2015“ [12] und „AU – 28.09.2016“ [15]	54
Bild 47	Frequenzverläufe zum Zeitpunkt der Abtrennung der Iberischen Halbinsel am 24.07.2021	55
Bild 48	Scheitelpunkt der Netzfrequenz – Frequenzverläufe, Netzspannungen und Spannungswinkeldifferenz	56
Bild 49	COMTRADE-Auswertung Merida-UFLS-Relais	56
Bild 50	Prüfung zur Bestimmung der Auslösezeit; a) mit stetiger Frequenzänderung b) mit Frequenzsprung	57
Bild 51	Auslösezeit und gemessene Auslösezeit bei geringem Frequenzgradient; a) obere Toleranzgrenze b) untere Toleranzgrenze	58
Bild 52	Störgrößenfreier Frequenzsprung	60
Bild 53	Frequenzvariation ohne Anpassung der Phasenlage	60
Bild 54	Frequenzverlauf der Prüfung – Blockade bei Unterspannung, keine Überfunktion	65
Bild 55	Frequenzverlauf der Prüfung – Blockade bei Unterspannung, keine Unterfunktion	65
Bild 56	Frequenzverlauf der Prüfung – ohne Störgrößen, keine Überfunktion	66
Bild 57	Frequenzverlauf der Prüfung – ohne Störgrößen, keine Unterfunktion	66
Bild 58	Frequenzverlauf der Prüfung – Phasensprung, keine Überfunktion	67
Bild 59	Frequenzverlauf der Prüfung – Phasensprung, keine Unterfunktion	67
Bild 60	Frequenzverlauf der Prüfung – Spannungssprung, keine Überfunktion	68
Bild 61	Frequenzverlauf der Prüfung – Spannungssprung, keine Unterfunktion	68
Bild 62	Frequenzverlauf der Prüfung – (Zwischen-)Harmonische, keine Überfunktion	69
Bild 63	Frequenzverlauf der Prüfung – (Zwischen-)Harmonische, keine Unterfunktion	69
Bild 64	Frequenzverlauf der Prüfung – überlagerte Nullspannung, keine Überfunktion	70

Bild 65	Frequenzverlauf der Prüfung – überlagerte Nullspannung, keine Unterfunktion	71
Bild 66	Weg-Zeit-Diagramm eines typischen Mittelspannungs- Vakuumleistungsschalters.....	73
Bild 67	Einfache PLL.....	75
Bild 68	Bode-Diagramm einer Bandsperre (Notch-Filter)	76
Bild 69	PLL mit Notch-Filter für Mitsystemkomponente	77
Bild 70	Optimierungsaufgaben bezüglich eines gemeinsamen Systemschutzes in Bezug auf die Verarbeitung der Frequenzmessung	78
Bild 71	Adaptiver Unterfrequenzlastabwurf (Beschleunigung der $f <$ -Stufe 1).....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht relevanter VDE-Anwendungsregeln	13
Tabelle 2	Toleranzband für den normalen Netzbetrieb gemäß VDE-Anwendungsregeln ...	14
Tabelle 3	Einstellempfehlung Frequenzschutz gemäß VDE-Anwendungsregeln	15
Tabelle 4	Rahmenbedingungen UFLA.....	16
Tabelle 5	Erforderliche Maßnahmen für typische maximale Wirkleistungssprünge.....	36
Tabelle 6	Maximal zulässige Oberschwingungspegel in öffentlichen Mittelspannungsnetzen nach IEC 61000-2-12; THD _{Max} = 8 %	39
Tabelle 7	Testergebnisse ohne Störgrößen.....	59
Tabelle 8	Ausgewählte Testergebnisse mit zusätzlichem Phasensprung	59
Tabelle 9	Prüfanforderungen.....	64
Tabelle 10	Übersicht der Prüfungen	72

Abkürzungsverzeichnis

ADC	.....	Analog-Digital-Converter
AWE	.....	Automatische Wiedereinschaltung
CBLS	.....	Contingency Based Load Shedding
DFT	.....	Diskrete Fourier-Transformation
EE	.....	Erneuerbare Energien
ENTSO-E	.....	European Network of Transmission System Operators
FFT	.....	Fast-Fourier-Transformation
FIR	.....	Finite-Impulse-Response
IIR	.....	Infinite-Impuls-Response
LS	.....	Leistungsschalter
LSE	.....	Least-Square-Estimation
NC ER	.....	Network Code Electricity Emergency and Restoration
NDZ	.....	Non-Detection-Zone
PLL	.....	Phase-Locked-Loop
PMU	.....	Phasor Measurement Unit
ROCOF	.....	Rate of Change of Frequency
SFR	.....	Simplified-Frequency-Response
THD	.....	Total Harmonic Distortion
UFLA	.....	Unterfrequenzlastabwurf

Formelverzeichnis

df/dt	Frequenzänderung (quasi-stetig)
f	Betriebsfrequenz, Momentanwert
f_{nenn}	Nennfrequenz 50 Hz, oder auch Bemessungsfrequenz (rated frequency f_r)
$f_{<}$	Einstellwert des Unterfrequenzschutzes
Δf	Betrag der geforderten Genauigkeit ohne Störgrößen: Der Unterfrequenzschutz spricht bei $f > (f_{<} + \Delta f)$ sicher nicht an, bei $f < (f_{<} - \Delta f)$ spricht er sicher an, wenn keine Störgrößen vorhanden sind.
Δf_{ob}	Betrag der geforderten Genauigkeit bei Prüfungen zur Überfunktion mit Störgrößen: Der Unterfrequenzschutz spricht bei $f > (f_{<} + \Delta f_{\text{ob}})$ sicher nicht an, wenn Störgrößen vorhanden sind.
Δf_{un}	Betrag der geforderten Genauigkeit bei Prüfungen zur Unterfunktion mit Störgrößen: Der Unterfrequenzschutz spricht bei $f > (f_{<} + \Delta f_{\text{un}})$ sicher an, wenn Störgrößen vorhanden sind.
H	Äquivalente Trägheitskonstante aller synchronlaufenden Erzeugungseinheiten
ΔP	Änderung der Wirkleistung ($P_{\text{Verbrauch}} - P_{\text{Erzeugung}}$)
S_{nenn}	Nennscheinleistung der Maschinen
$t_{\text{AF}i}$	Auslösezeit des Unterfrequenzschutzes bei der i -ten Prüfung. Falls Rampen verwendet werden, gilt als Auslösezeit die Zeit vom ersten Unterschreiten des Ansprechwertes bis zum Schließen des AUS-Kontaktes der Schutzeinrichtung.
t_{AFmmax}	maximale Auslösezeit mit Störgrößen Maximalwert aller Messungen mit Störgrößen
$t_{\text{AFo max}}$	maximale Auslösezeit ohne Störgrößen Maximalwert aller Messungen ohne Störgrößen
t_{nach}	Zeitdauer, während der keine Überfunktion auftreten darf
t_{vor}	Dauer der Vorfehlerspannung bei Prüfungen
U_{B}	Der Spannungswert, der unterschritten sein muss, damit der Unterfrequenzschutz blockiert ist.

Vorwort

Für eine robuste Regelung und Fehlerdetektion in elektrischen Netzen ist die Netzfrequenz eine wichtige Größe. In schnell wechselnden (transienten) Netzzuständen ist die Netzfrequenz jedoch in der Regel nicht eindeutig definierbar und es muss ein Kompromiss zwischen einer sehr genauen und einer sehr schnellen Messung gefunden werden.

Dieser FNN-Hinweis beschreibt die Zusammenhänge zwischen Messdauer und Messgenauigkeit nach aktuellem Wissensstand und ermöglicht einen Überblick über verschiedene Messverfahren und deren Anwendungsfälle. Der Fokus liegt vor allem auf dem Netzschutz und der Hinweis richtet sich folglich an Netzbetreiber, Hersteller und Anwender. Er ersetzt Version 1 des FNN-Hinweises „Ermittlung und Bewertung der Netzfrequenz – Auswirkungen netzseitiger Störeinflüsse“ von 2017. Die Kapitel wurden nach Funktionen und Einsatzgebieten neu gegliedert und thematisch erweitert.

Dieser FNN-Hinweis wurde vom FNN-Expertenetzwerk Netzschutz im Auftrag des FNN-Lenkungskreises Netztechnik und Netzbetrieb überarbeitet. Er ist mit dem VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen und dem Arbeitskreis „Schutztechnik“ von ÖESTERREICHS ENERGIE abgestimmt und wird gemeinschaftlich herausgegeben.