

電力中央研究所報告

PV用PCSに備わる単独運転検出機能の
設定値を用いた周波数変化率耐量の概算手法

研究報告：R17005

2018年6月

 電力中央研究所



CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

PV用PCSに備わる単独運転検出機能の 設定値を用いた周波数変化率耐量の概算手法

白崎 圭亮^{*1} 天野 博之^{*2}

キーワード：太陽光発電
FRT 要件
単独運転検出機能
PV 脱落
周波数変化率

Key Words : Photovoltaics Generation
Fault Ride Through Requirements
Islanding Detection Function
Secondary PV Trip
Rate of Change of Frequency

Estimation Method of RoCoF Tolerance Using Setting Values of Islanding Detection Function

Keisuke Shirasaki and Hiroyuki Amano

Abstract

In recent years, the penetration of the Photovoltaics Generation (PV) is increasing in Japan. With the reduced rotational inertia in the power system due to the high penetration of the PV, the Rate of Change of Frequency (RoCoF) in a large generation tripping could become more severe. Under the high RoCoF condition, the islanding detection function of the grid-connected converter might disconnect unnecessarily the PV. Since each converter has the different sensitivity of the islanding detection function, it's difficult to predict the amount of the secondary PV trip. To tackle this problem, this report presents a new estimation method of the RoCoF tolerance of the PV. The RoCoF tolerance for each type of the converter is easily obtained using the setting values of the islanding detection function. The validity of the proposed method was verified by comparison with the time-domain simulation.

^{*1} システム技術研究所 電力システム領域 主任研究員
^{*2} システム技術研究所 電力システム領域 上席研究員

背景

太陽光発電（PV）の導入拡大に伴い、系統擾乱発生時の PV 脱落が系統の安定性に及ぼす影響が顕在化しつつある。特に、電源脱落事故時は電圧位相跳躍および周波数低下が生じるため、FRT 要件¹⁾を満たしていない PCS 機種（FRT 非対応機種）が単独運転検出機能の受動的方式の不要動作により広範囲で脱落し、周波数低下を助長するおそれがある²⁾。一方、単独運転検出機能の設定値は PCS 機種毎に異なり、周波数変動発生事象後にどの PCS 機種がどの時点で脱落するかを簡易に推定するのは困難であった。

目的

主な FRT 非対応機種を対象に、単独運転検出機能の設定値から、脱落に至らない周波数変化率（RoCoF：Rate of Change of Frequency）の限度値（RoCoF 耐量）および RoCoF がこれを超過した場合の検出時間（RoCoF 検出時間）を概算する手法を提案する³⁾。また、Y 法用 PV モデルを用いたシミュレーション解析により提案手法の妥当性を検証する。

主な成果

1. RoCoF 耐量・RoCoF 検出時間の概算手法の提案

JEMA 資料⁴⁾によると、FRT 非対応機種 52 グループ⁵⁾中 49 グループで周波数変化率検出方式・電圧位相跳躍検出方式が受動的方式として採用されており、これらの判定ロジック（図 1）は共通とみなすことができる。これらの方式では、発生した RoCoF に応じて一定の時間（ $t_{\text{過去}} + t_{\text{保持}}$ ）が経過するまで周期偏差 ΔT が急増する（図 2）。この特性に着目して判定ロジックを定式化することにより、単独運転検出機能の設定値を用いて図 2 の式から RoCoF 耐量および RoCoF 検出時間を概算できる。

本手法では、PCS が検出する電圧位相跳躍が小さい条件⁶⁾において、シミュレーションを行うことなく RoCoF により脱落する PCS 機種を推定できる。ただし、事故点から PCS 連系点までの電氣的距離が短いほど、また、単独運転検出機能の $t_{\text{最近}}$ が短いほど、PCS が検出する電圧位相跳躍は大きくなる傾向があるため、このような条件下では電圧位相跳躍による脱落の可能性も別途シミュレーション等により確認する必要がある。

2. 提案手法の妥当性検証

表 1 に示す代表的な PCS 機種の RoCoF 耐量および RoCoF 検出時間について、電圧位相跳躍を含めない条件で提案手法と Y 法用 PV モデル⁷⁾の応動を比較した。その結果、両者は概ね合致しており、提案手法により妥当な値が得られることを確認した（表 1、図 3）。

注 1) FRT 要件では、 $\pm 2\text{Hz/s}$ のランプ状の周波数変動、 $+0.8\text{Hz}$ （3 サイクル継続）のステップ状の周波数変動のそれぞれに対して運転を維持することが要求されている。

2) 電力広域的運営推進機関、「過去の EPPS 動作実績」、第 11 回調整力及び需給バランス評価などに関する委員会

- 3) なお、電圧位相跳躍による単独運転検出機能の動作については、本手法とは別に確認する必要がある。
- 4) 日本電気工業会、「各単独運転防止方式の概要」、<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fukusudai/kenshutsu.html>
- 5) 能動的方式にステップ注入付き周波数フィードバック方式が採用されていない場合は FRT 非対応機種とみなした。
- 6) PCS 機種毎に異なる $\Delta T_{しきい値}$ に対して、電圧位相跳躍による ΔT の増加が十分小さい場合を指す。
- 7) 白崎圭亮・北内義弘「再生可能エネルギー大量導入時の各種系統条件が基幹系統の系統安定度に及ぼす基本的な影響」、電中研報告書 R14013, 2015年8月

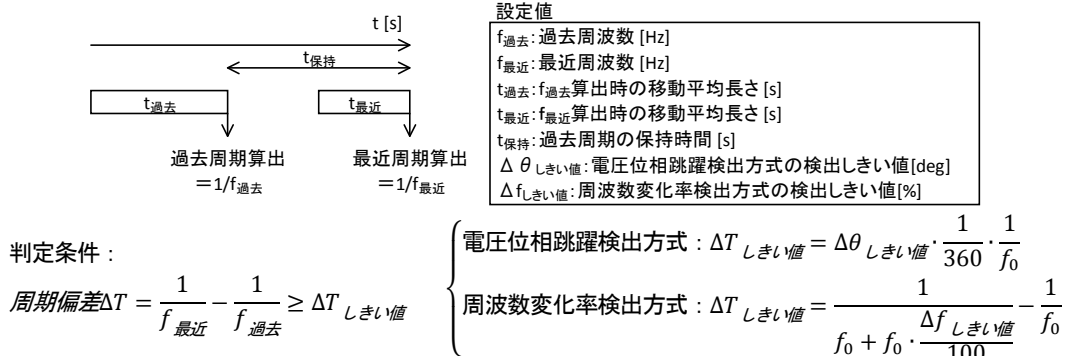


図1 電圧位相跳躍検出方式, 周波数変化率検出方式で共通する基本的な判定ロジック

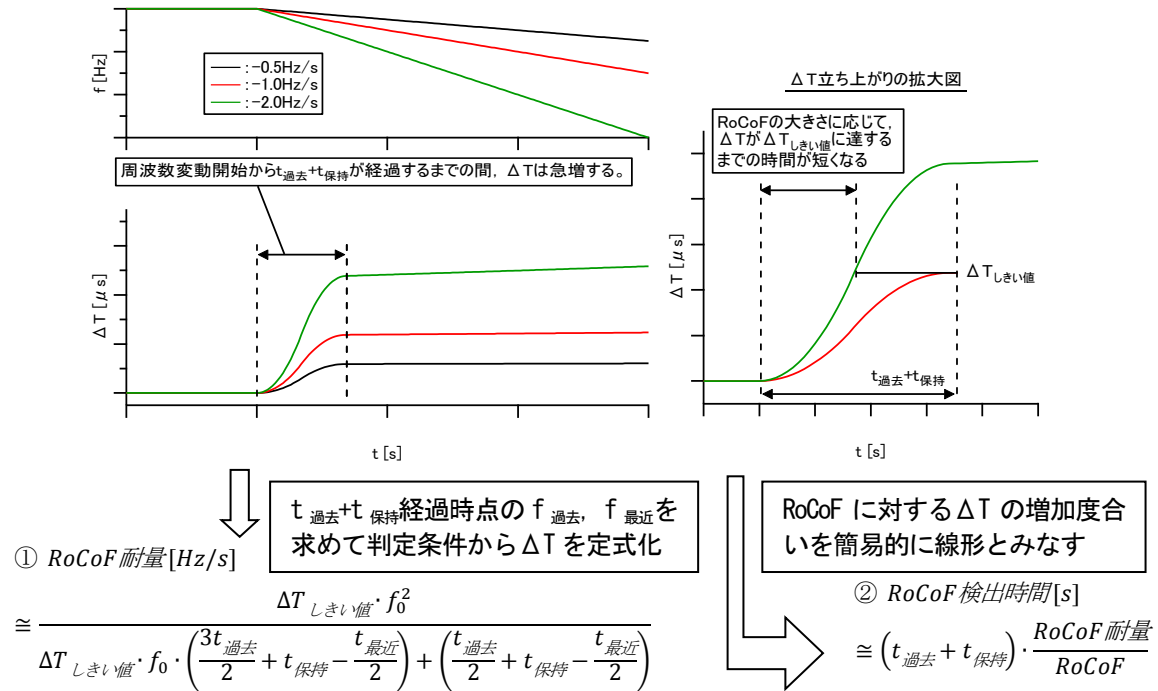


図2 RoCoF に対する ΔT の増加の関係から求めた RoCoF 耐量, RoCoF 検出時間の概算式

表1 提案手法による RoCoF 耐量の妥当性検証結果 (60Hz の例)

グループ ¹⁾	RoCoF 耐量 [Hz/s]	
	提案手法による算出値	Y 法用 PV モデルによる検証値
B	4.551	4.506
N	0.598	0.532
H	0.035	0.035
S	0.888	0.826

1) JEMA 資料においてグルーピングされた複数機種が該当する。グループ名は JEMA 資料に準拠している。

発生した RoCoF が RoCoF 検出時間を超えると (下図、枠線の範囲内), PCS の受動的方式が不要動作するものとして脱落する PCS 機種を推定できる。

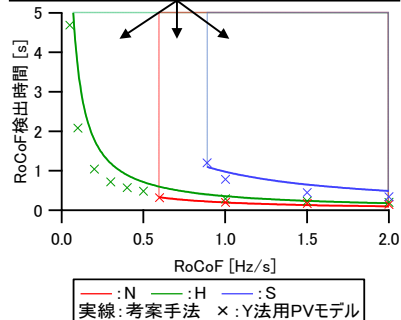


図3 提案手法による RoCoF 検出時間の妥当性検証結果 (60Hz の例)

目 次

1. はじめに	1
2. RoCoF 耐量の概算手法	1
3. 実在する FRT 非対応機種 の RoCoF 耐量 の特徴	5
4. Y 法シミュレーション解析による提案手法の妥当性検証	8
5. おわりに	12
参考文献	13

1. はじめに

低炭素社会の実現に向け再生可能エネルギー電源、特に太陽光発電（PV）の導入が進んでおり、我が国では「長期エネルギー需給見通し」において 2030 年までに太陽光発電を 64GW、風力発電を 10GW 導入する目標が掲げられている。このうち、PV は平成 28 年 12 月時点で約 40GW（設備容量）が導入されており、平常時の需給運用のみならず、緊急時の系統安定性についても電力系統への影響が顕在化しつつある。

一定の需要に対し PV 出力が増加すれば既存の同期発電機（発電機）による出力は減少させる必要があり、下げ代の制約や経済運用のために発電機を停止させる場合もある。このとき、系統に並列された発電機の容量の減少は系統全体の慣性や電圧維持能力などが減少することを意味しており、系統事故時の周波数安定性や過渡安定度が低下するおそれがある。例えば、大電源脱落や系統分離などが発生した場合においては、慣性の減少により、系統に残された発電機の回転速度は変化しやすくなるため、周波数変化率（ $|\text{df}/\text{dt}|$ ）または RoCoF:Rate of Change of Frequency）は増加傾向となる¹⁾。

一方で、PV に用いられるパワーコンディショナ（PCS : Power Conditioning Subsystem）には基本的に単独運転検出機能が備わっており¹⁾、連系点電圧の周期偏差または周波数偏差による単独運転の判定が行われる。このため、大電源脱落事故時は電圧位相跳躍および周波数低下が生じるため、FRT 要件を満たしていない PCS 機種（FRT 非対応機種）が単独運転検出機能の受動的方式の不要動作により広範囲で脱落し、周波数低下を助長するおそれがある¹⁾ ²⁾。なお、ここでの「脱落」とは、PCS がゲートブロック後、系統条件が異常

で復帰できない状態を指す。一方、単独運転検出機能の設定値は PCS 機種毎に異なり、脱落が生じる RoCoF には差異がある。このため、現状は各種の単独運転検出機能を個別にモデリングし、所望の周波数変動を与えるシミュレーション解析などにより PCS 機種の脱落を推定していた。このため、周波数変動発生時にどの PCS がどの時点で脱落するかを簡易に推定するのは困難であった。

そこで、本研究では FRT 非対応機種を対象に、単独運転検出機能の設定値から、脱落に至らない RoCoF の限度値（RoCoF 耐量）および RoCoF がこれを超過した場合の検出時間（RoCoF 検出時間）を概算する手法を考案する。なお、電圧位相跳躍による単独運転検出機能の動作については、通常の Y 法シミュレーションで模擬している上位系統と、PV が実際に連系される下位系統の電圧位相跳躍量の差異を推定する必要があるため、本手法とは別に確認する必要がある。これには、精度の高い下位系統のモデリングが必要となる。

以降、第 2 章では単独運転検出機能の概要と RoCoF 耐量の概算手法について述べる。第 3 章では Web 上で公開されている JEMA 資料³⁾の情報を基に、実在する FRT 非対応機種の単独運転検出機能の設定値から RoCoF 耐量を算出し、それらの特徴を整理する。第 4 章では Y 法用 PV モデルを用いた Y 法シミュレーションにより、考案手法の妥当性を示す。最後に、第 5 章で本研究の結論を述べる。

2. RoCoF 耐量の概算手法

現在、我が国では FRT 要件により $\pm 2\text{Hz/s}$ の周波数変動に対して PV は運転を継続することが要求されており、PCS の単独運転検出機能はこの要件を満足するように設計する必要がある。一方、FRT 要件が定められる以前の FRT 非対応機種（本稿では、能動的方式にステップ注入付周波数

¹⁾ 転送遮断装置などが付加され、単独運転検出機能が省略される場合もある。

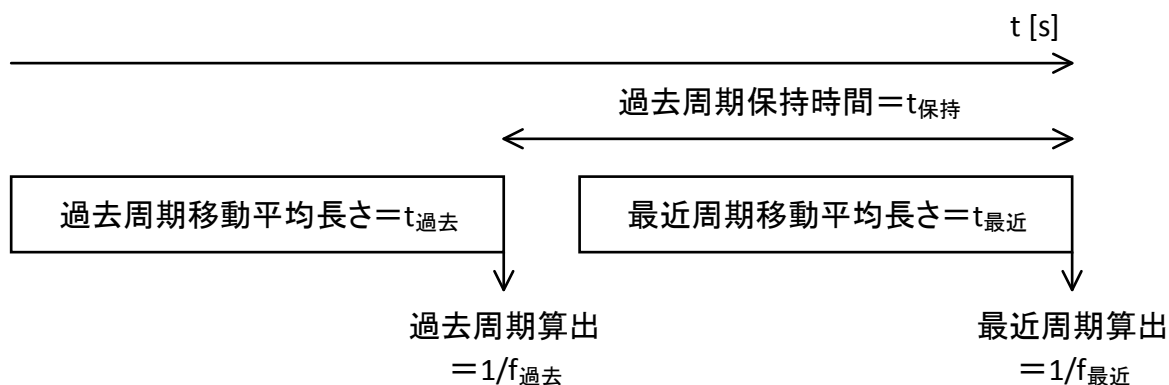


図 2.1 電圧位相跳躍検出方式，周波数変化率検出方式の基本的な判定ロジック

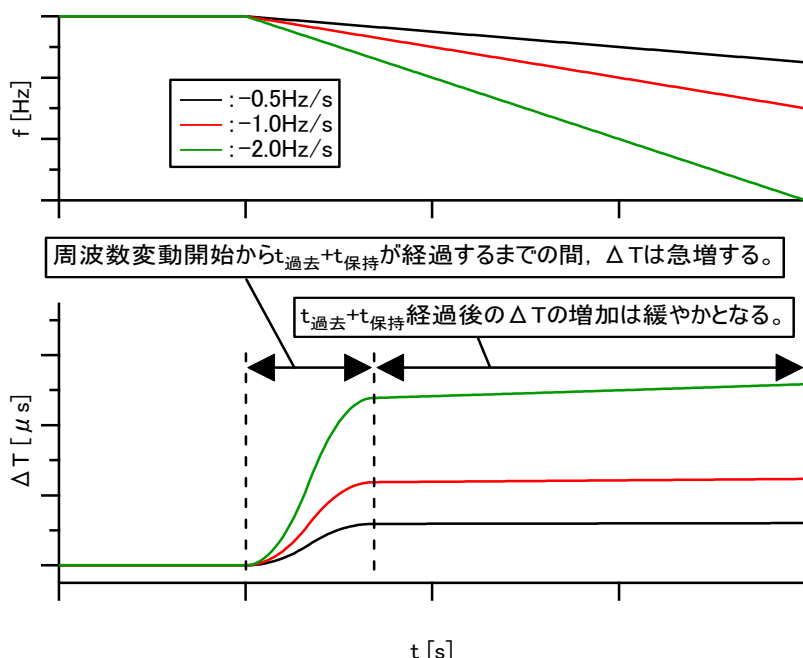


図 2.2 ランプ状の周波数変動と判定ロジックの中で算出された ΔT の関係

フィードバック方式が採用されていない機種を FRT 非対応機種とみなす) については RoCoF が $\pm 2\text{Hz/s}$ に達していなくとも脱落するおそれがある。

FRT 非対応機種の単独運転検出機能は受動的方式的検出感度が高く，その代表的な方式には周波数変化率検出方式，電圧位相跳躍検出方式がある。これらは基本的に移動平均により算出された最近周期と過去周期の差分がしきい値を超えたかどうかで単独運転の判定を行っている^[3]ため，共通のロジックとみなすことができると考えられる (図 2.1)。そこで，本研究では周波数がランプ状に変動した場合について，判定ロジックの設定値から RoCoF 耐量を簡易的に求める手法を考案した。また，電圧位相跳躍による不要動作防止用のオンディレイタイマの影響は RoCoF 耐量には影響しないため (検出時間には影響あり)，ここでは考慮しないこととした。周波数がランプ状に変化し

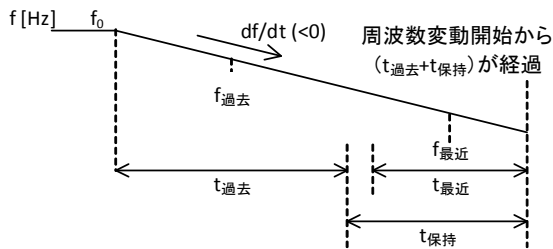


図 2.3 ランプ状の周波数変動開始から
 $t_{過去} + t_{保持}$ が経過した時点の $f_{過去}$, $f_{最近}$

た場合、判定ロジックの中で算出された周期偏差 ΔT が増大していき、周期換算の $\Delta T_{しきい値}$ を超えた場合に単独運転状態と判定される。この判定条件は (2.1) 式で表すことができる。

$$\Delta T = \frac{1}{f_{最近}} - \frac{1}{f_{過去}} \geq \Delta T_{しきい値} \quad (2.1)$$

このとき、検出しきい値は電圧位相跳躍検出方式の場合は $\Delta \theta_{しきい値} [\text{deg}]$ 、周波数変化率検出方式の場合は $\Delta f_{しきい値} [\%]$ として与えられるが、それぞれ (2.2) 式により $\Delta T_{しきい値} [\text{s}]$ に換算できる。

$$\begin{cases} \Delta T_{しきい値} = \Delta \theta_{しきい値} \cdot \frac{1}{360} \cdot \frac{1}{f_0} \\ \Delta T_{しきい値} = \frac{1}{f_0 + f_0 \cdot \frac{\Delta f_{しきい値}}{100}} - \frac{1}{f_0} \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、 ΔT の増加の仕方に着目すると、図 2.2 に示すように df/dt の大きさに関わらず、ランプ状の周波数変動が開始してから $t_{過去} + t_{保持}$ が経過するまで ΔT が急増し、その後緩やかに増加する。 $t_{過去} + t_{保持}$ 経過時点で ΔT が検出しきい値に達するランプ状の周波数変動のレベルが概ね RoCoF 耐量に相当すると考え、 $t_{過去} + t_{保持}$ 経過時点の $f_{最近}$, $f_{過去}$ および ΔT を定式化することを考える。なお、 $t_{過去}$ は $f_{過去}$ を求めるための移動平均長さ[s]であり、 $t_{保持}$ は $f_{過去}$ 算出時と $f_{最近}$ 算出時の時間差[s]を表している。

周波数が $df/dt (<0)$ の速度でランプ状に変動

する場合、図 2.3 に示すように $f_{最近}$, $f_{過去}$ はそれぞれの移動平均長さの中間値と考えることができる。このため、判定ロジックの時間に関する設定値 ($t_{過去}$, $t_{最近}$, $t_{保持}$) と df/dt および周波数の初期値 f_0 を用いて、 $t_{過去} + t_{保持}$ 経過時点の $f_{最近}$, $f_{過去}$ は (2.3) 式で表される。

$$\begin{cases} f_{最近} = f_0 + \frac{df}{dt} \cdot \left(t_{過去} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right) \\ f_{過去} = f_0 + \frac{df}{dt} \cdot \frac{t_{過去}}{2} \end{cases} \quad (2.3)$$

単独運転検出条件である (2.1) 式と (2.3) 式を連立すれば (2.4) 式が得られる。すなわち、(2.4) の不等式が成り立つ場合に単独運転が検出されることを意味し、等号が成り立つ場合の df/dt が RoCoF 耐量に対応することとなる。

ここで、文献[3]を参考に代表的な設定値を後述する表 4.1 のように与えた場合、いずれの場合も右辺の $(df/dt)^2$ 項の絶対値が他の項に比べ十分小さいことがわかる (表 2.1)。そこで、(2.4) 式から $(df/dt)^2$ 項を除くと、(2.5) 式のように RoCoF の概算式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} \cdot \left(-t_{過去} - t_{保持} + \frac{t_{最近}}{2} \right) &\geq \Delta T_{しきい値} \cdot f_0^2 + \dots \\ \frac{df}{dt} \cdot \Delta T_{しきい値} \cdot f_0 \cdot \left(\frac{3t_{過去}}{2} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right) &+ \dots \\ \left(\frac{df}{dt} \right)^2 \cdot \Delta T_{しきい値} \cdot \frac{t_{過去}}{2} \cdot \left(t_{過去} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right) & \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} &\leq \frac{-\Delta T_{しきい値} \cdot f_0^2}{\Delta T_{しきい値} \cdot f_0 \left(\frac{3t_{過去}}{2} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right) + \left(\frac{t_{過去}}{2} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right)} \\ \therefore \text{RoCoF 耐量} [\text{Hz/s}] &\cong \frac{\Delta T_{しきい値} \cdot f_0^2}{\Delta T_{しきい値} \cdot f_0 \left(\frac{3t_{過去}}{2} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right) + \left(\frac{t_{過去}}{2} + t_{保持} - \frac{t_{最近}}{2} \right)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

なお、過去周期、最近周期の算出に移動平均値でなく合計値を用いる機種も存在するが、 n サイクルの移動平均値に対して n サイクルの合計値は

n 倍の値となる。したがって、検出しきい値を 1/n 倍とすれば合計値を移動平均値とみなせるため、(2.5) 式を適用することができる。これには表 3.1 のグループ N などが該当するが、検出しきい値は他と同程度の設定となっているため、RoCoF 耐量が小さくなる特徴がある。

ここで、周波数変動開始から $t_{\text{過去}} + t_{\text{保持}}$ が経過するまでの ΔT の増加は S 字カーブを描く。この時間領域では、基準周波数に対する $f_{\text{過去}}$ の乖離が比較的小さいことに着目し、 ΔT の増加度合いを簡易的に線形とみなせば、 ΔT の増加の傾きと RoCoF 検出時間はほぼ反比例の関係となる (図 2.3)。すなわち、RoCoF 耐量の n (>1) 倍の周波数変化率が生じた場合の RoCoF 検出時間は 1/n 倍になるとみなせ、この関係は (2.6) 式で表すことができる。なお、今回はオンディレイタイムの影響を考慮していないが、考慮する場合は (2.6) 式で示した RoCoF 検出時間にタイム時間を加算すれば良い。

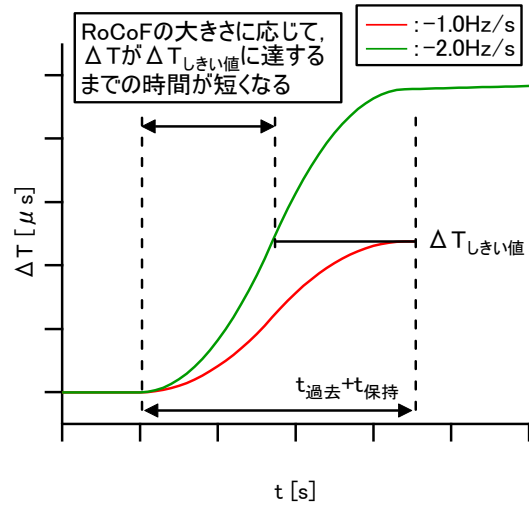


図 2.4 図 2.2 における ΔT 立ち上がり時の拡大図

$$RoCoF \text{ 検出時間 [s]} \cong (t_{\text{過去}} + t_{\text{保持}}) \cdot \frac{RoCoF \text{ 耐量}}{RoCoF} \quad (2.6)$$

表 2.1 (a) (2.4) 式の各項値の例 (50Hz, -2.0Hz/s)

グループ	方式	$t_{\text{過去}}$ [cyc]	$t_{\text{最近}}$ [cyc]	$t_{\text{保持}}$ [cyc]	$\Delta T_{\text{しきい値}}$ [μs]	左辺 (df/dt) ¹ 項	右辺 (df/dt) ⁰ 項	右辺 (df/dt) ¹ 項	右辺 (df/dt) ² 項
B	電圧位相跳躍	32	1	1	444.4	1.300000	1.111000	-0.043107	0.000370
N	検出方式	10	10	10	33.3	0.600000	0.083250	-0.001332	0.000004
H	周波数変化率	500	10	10	59.8	20.200000	0.149500	-0.090298	0.012080
S	検出方式	50	5	5	166.7	2.100000	0.149500	-0.009269	0.000126

表 2.1 (b) (2.4) 式の各項値の例 (60Hz, -2.0Hz/s)

グループ	方式	$t_{\text{過去}}$ [cyc]	$t_{\text{最近}}$ [cyc]	$t_{\text{保持}}$ [cyc]	$\Delta T_{\text{しきい値}}$ [μs]	左辺 (df/dt) ¹ 項	右辺 (df/dt) ⁰ 項	右辺 (df/dt) ¹ 項	右辺 (df/dt) ² 項
B	電圧位相跳躍	32	1	1	370.4	1.083333	1.333440	-0.035929	0.000214
N	検出方式	10	10	10	27.8	0.500000	0.100080	-0.001112	0.000002
H	周波数変化率	600	12	12	49.9	20.200000	0.179640	-0.090419	0.010080
S	検出方式	60	6	6	138.9	2.100000	0.179640	-0.009281	0.000105

3. 実在する FRT 非対応機種 of RoCoF 耐量の特徴

日本電機工業会 (JEMA) の Web 上では、低圧連系用 PCS に関して単独運転検出機能の検出方式や判定ロジック、設定値がある程度公開されており、さらにこれらを同一とした複数の機種がグループ化されている^[3]。厳密には時期が異なるが、FRT 要件が定められた時期と新型能動的方式であるステップ注入付周波数フィードバック方式の販売が開始された時期は近いと見られるため、ここではステップ注入付周波数フィードバック方式が採用されていない機種を FRT 非対応機種とみなした。FRT 非対応機種 52 グループ中、本手法が適用可能と考えられる機種として 49 グループが該当した。これらの設定値と (2.5) 式により算出した RoCoF 耐量を表 3.1 に示す。ただし、(2.5) 式により RoCoF 耐量を算出するために必要な設定値が部分的に不明の機種がいくつか存在した。そこで、機種によってはばらつきが大きいと考えられる $t_{過去}$ や検出しきい値が不明の場合は RoCoF 耐量を不明とし、 $t_{最近}$ が不明の場合は仮の値として 1cyc を与え、 $t_{保持}$ が不明の場合は $t_{最近}$ と同値 (表 3.1 から $t_{保持} = t_{最近}$ の場合が多い傾向が読み取れる) を与え、仮の値として RoCoF 耐量を算出した。表 3.1 に示した RoCoF 耐量の算出結果および (2.5) 式から得られる知見を以下に述べる。

- $t_{過去}$ 、 $t_{保持}$ が大きいほど、また、 $\Delta T_{しきい値}$ 、 $t_{最近}$ が小さいほど、RoCoF 耐量は小さくなる。
- FRT 非対応機種であっても RoCoF 耐量が 2Hz/s (FRT 要件) を下回る機種は限られる。ただし、周波数変化率検出方式には $t_{過去}$ が大きく、さらに $\Delta T_{しきい値}$ が小さいことにより RoCoF 耐量が非常に小さい機種が存在する。
- 同一の判定ロジック、設定値であっても、基準

周波数 50Hz に対する 60Hz の RoCoF 耐量は基本的に 1.44 倍または 1.2 倍の大きさとなる。

(2.5) 式において $\Delta T_{しきい値} \cdot f_0$ は無次元量であり、分母の t の与え方が「サイクル数」の場合は分母が f_0 の逆数に比例するため、RoCoF 耐量は f_0^2 に比例する。これは電圧位相跳躍検出方式が多く該当する。一方、分母の与え方が「秒」の場合は、分母が f_0 に依存せず一定となるため、RoCoF 耐量は f_0 に比例する。これは周波数変化率検出方式が多く該当する。

- 低圧連系用 PCS に関して、RoCoF 耐量の算出に必要な設定値が部分的に不明の機種が存在する (高圧連系用 PCS に関しては単独運転検出機能の設定値が全く開示されていない)。PCS メーカーからの情報提供などによりこれらの設定値が明らかとなれば、RoCoF 量の算出精度が向上する。

表 3.1 (a) 実在する機種 of 受動的方式 of 設定値と RoCoF 耐量算出値

グループ ¹⁾	方式 ²⁾	t _{過去} [cyc]	t _{最近} [cyc]	t _{保持} [cyc]	ΔT _{しきい値} [μs] ³⁾		RoCoF 耐量 [Hz/s] ⁴⁾	
					50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
A	位	8	1	8	166.7	138.9	1.786	2.572
B	位	32	1	不明	444.4	370.4	3.161	4.551
C	位	1	1	不明	444.4	370.4	53.19	76.60
E	位	8	1	不明	222.2	185.2	5.988	8.623
F	位	8	1	不明	222.2	185.2	5.988	8.623
G	位	10	2	2	138.9	115.7	2.841	4.091
H	周	50Hz:500 60Hz:600	50Hz:10 60Hz:12	不明	59.8	49.9	0.029	0.035
I, J	周	50Hz:500 60Hz:600	50Hz:10 60Hz:12	不明	59.8	49.9	0.029	0.035
K	周	50Hz:500 60Hz:600	50Hz:10 60Hz:12	不明	59.8	49.9	0.029	0.035
L	位	1	1	1	444.4	370.4	53.19	76.60
N	位	10	10	10	33.3	27.8	0.415	0.598
O	位	10	10	10	33.3	27.8	0.415	0.598
P	位	不明	1	不明	277.8	231.5	不明	不明
Q	位	不明	1	1	277.8	231.5	不明	不明
R	周	不明	不明	不明	59.8	49.9	不明	不明
S	位	50Hz:50 60Hz:60	50Hz:5 60Hz:6	不明	166.7	138.9	0.740	0.888
T	位	不明	不明	不明	222.2	185.2	不明	不明
U	位	1	1	1	222.2	185.2	27.17	39.13
V	位	1	1	1	222.2	185.2	27.17	39.13
W	位	1	1	1	222.2	185.2	27.17	39.13
X	周	不明	不明	不明	59.8	49.9	不明	不明
Y	位	32	1	不明	444.4	370.4	3.161	4.551
Z	位	1	1	1	222.2	185.2	27.17	39.13

1) Web 上のグループ名^[3]と同一

2) 位：電圧位相跳躍検出方式 周：周波数変化率検出方式

3) (2.2) 式により換算後の値

4) グレーは RoCoF 耐量が 2Hz/s を下回るグループを示す

表 3.1 (b) 実在する機種 of 受動的方式 of 設定値と RoCoF 耐量算出値

グループ ¹⁾	方式 ²⁾	t _{過去} [cyc]	t _{最近} [cyc]	t _{保持} [cyc]	ΔT _{しきい値} [μs] ³⁾		RoCoF 耐量 [Hz/s] ⁴⁾	
					50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
AA	周	50Hz:500 60Hz:600	50Hz:10 60Hz:12	不明	59.8	49.9	0.029	0.035
AB	位	1	1	1	222.2	185.2	27.17	39.13
AC	位	不明	不明	不明	277.8	231.5	不明	不明
AD	位	4	2	不明	333.3	277.8	13.369	19.25
AF	周	不明	不明	不明	59.8	49.9	不明	不明
AG	周	不明	不明	不明	20.0	16.7	不明	不明
AH	位	10	1	1	222.2	185.2	4.897	7.052
AI	周	50Hz:500 60Hz:600	50Hz:10 60Hz:12	不明	99.5	82.9	0.048	0.058
AJ	位	1	1	1	444.4	370.4	53.19	76.60
AK	周	不明	不明	不明	99.5	82.9	不明	不明
AL	位	8	1	1	400.0	333.3	10.53	15.16
AM	位	不明	1	不明	277.8	231.5	不明	不明
AO	周	不明	不明	不明	不明	不明	不明	不明
AP	位	32	8	8	62.5	52.1	0.387	0.558
AR	位	不明	不明	不明	166.7	138.9	不明	不明
AS	位	16	1	1	166.7	138.9	2.393	3.447
AT	位	不明	不明	不明	444.4	370.4	不明	不明
AU	位	不明	不明	不明	444.4	370.4	不明	不明
AV	位	16	1	1	166.7	138.9	2.393	3.447
AW	位	不明	不明	不明	277.8	231.5	不明	不明
AX	位	10	10	不明	500.0	416.7	5.952	8.571
AY	位	不明	1	50Hz:10 60Hz:12	444.4	370.4	不明	不明
AZ	位	8	1	8	222.2	185.2	2.371	3.414
BB	位	不明	不明	不明	277.8	231.5	不明	不明
BE	位	不明	不明	不明	277.8	231.5	不明	不明
BF	位	10	2	2	400.0	333.3	7.911	11.39

1) Web 上のグループ名^[3]と同一

2) 位：電圧位相跳躍検出方式 周：周波数変化率検出方式

3) (2.2) 式により換算後の値

4) グレーは RoCoF 耐量が 2Hz/s を下回るグループを示す

4. Y法シミュレーション解析による提案手法の妥当性検証

本章では、第2章で導出した RoCoF 耐量および RoCoF 検出時間の妥当性を検証する。まずは RoCoF 耐量の妥当性を検証するため、表 3.1 を参考に代表的な設定値（電圧位相跳躍検出方式 2 種、周波数変化率検出方式 2 種）を選定して基準周波数 50Hz および 60Hz に対する RoCoF 耐量を算出した（表 4.1）。また、同設定値により電圧位相跳躍検出方式 2 種、周波数変化率検出方式 2 種を模擬した Y 法用 PV モデル^[5]の動作結果との対比を行った。

(2.5) 式により算出した各グループの RoCoF 耐量（100%値とする）は異なるため、Y 法用 PV モデルに与えるランプ状の周波数変動のレベルは表 4.2 のように設定した。なお、これらのランプ状の周波数変動は下限値を基準周波数 50/60Hz それぞれに対し 47.5/57.0Hz と設定した。また、周波数変動を開始してから 20s が経過した時点で計算打ち切りとした。各種の周波数変動に対する

Y 法用 PV モデルの動作結果を図 4.1 に示す。

図 4.1 から、いずれのグループも算出された RoCoF 耐量（100%値）に対し受動的方式が動作しており、精度面は概ね良好であることが確認された。ただし、グループ N, S においては、算出された RoCoF 耐量（100%値）と Y 法用 PV モデルで受動的方式が動作する周波数変動レベルの乖離が比較的大きかった。この原因について考察するため、各グループに 97%値の周波数変動を与えた場合の ΔT の例を図 4.2 に示す。また、各グループの結果に対する考察を以下に示す。

表 4.1 (a) 実在する機種種の受動的方式の設定値と RoCoF 耐量算出値（50Hz）

グループ	検出方式	t _{過去} [cyc]	t _{最近} [cyc]	t _{保持} [cyc]	ΔT しきい値 [μ s]	RoCoF 耐量 [Hz/s]
B	電圧位相跳躍	32	1	1	444.4	3.161
N		10	10	10	33.3	0.415
H	周波数変化率	500	10	10	59.8	0.029
S		50	5	5	166.7	0.740

表 4.1 (b) 実在する機種種の受動的方式の設定値と RoCoF 耐量算出値（60Hz）

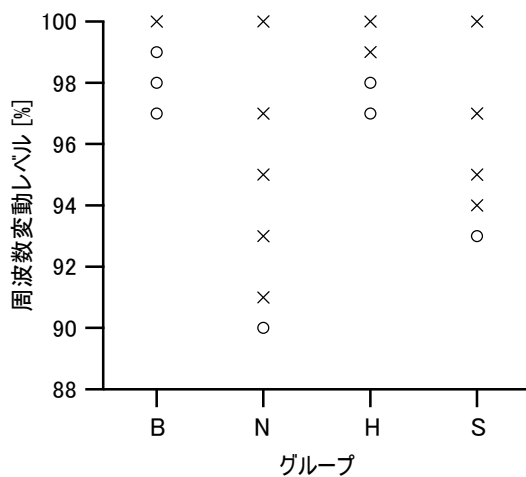
グループ	検出方式	t _{過去} [cyc]	t _{最近} [cyc]	t _{保持} [cyc]	ΔT しきい値 [μ s]	RoCoF 耐量 [Hz/s]
B	電圧位相跳躍	32	1	1	370.4	4.551
N		10	10	10	27.8	0.598
H	周波数変化率	600	12	12	49.9	0.035
S		60	6	6	138.9	0.888

表 4.2 (a) Y 法用 PV モデルに与えたランプ状の周波数変動レベル (50Hz)

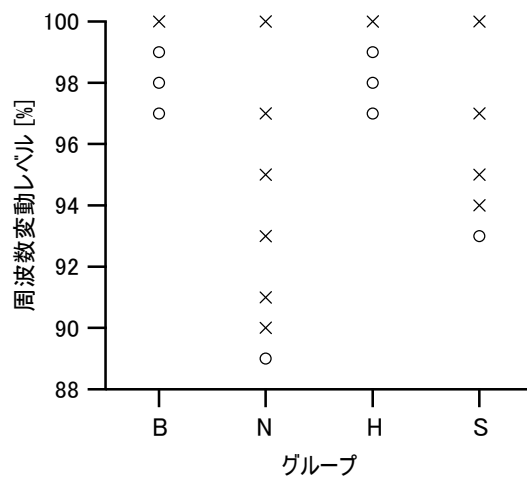
グループ	100%値 [Hz/s]	99%値 [Hz/s]	98%値 [Hz/s]	97%値 [Hz/s]	96%値 [Hz/s]	95%値 [Hz/s]	94%値 [Hz/s]	93%値 [Hz/s]	92%値 [Hz/s]	91%値 [Hz/s]	90%値 [Hz/s]	89%値 [Hz/s]
B	3.161	3.129	3.097	3.066	-	-	-	-	-	-	-	-
N	0.415	-	-	0.403	-	0.395	-	0.386	-	0.378	0.374	-
H	0.0291	0.0288	0.0285	0.0282	-	-	-	-	-	-	-	-
S	0.740	-	-	0.718	-	0.703	0.696	0.688	-	-	-	-

表 4.2 (b) Y 法用 PV モデルに与えたランプ状の周波数変動レベル (60Hz)

グループ	100%値 [Hz/s]	99%値 [Hz/s]	98%値 [Hz/s]	97%値 [Hz/s]	96%値 [Hz/s]	95%値 [Hz/s]	94%値 [Hz/s]	93%値 [Hz/s]	92%値 [Hz/s]	91%値 [Hz/s]	90%値 [Hz/s]	89%値 [Hz/s]
B	4.551	4.506	4.460	4.414	-	-	-	-	-	-	-	-
N	0.598	-	-	0.580	-	0.568	-	0.556	-	0.544	0.538	0.532
H	0.0349	0.0345	0.0342	0.0338	-	-	-	-	-	-	-	-
S	0.888	-	-	0.862	-	0.844	0.835	0.826	-	-	-	-



(a) 50Hz



(b) 60Hz

図 4.1 各周波数変動レベルに対する Y 法用 PV モデルの動作結果

○ : 運転継続

× : 受動的方式が動作

[グループ B]

周波数変化率が 4.414Hz/s の場合、周波数変動を開始してから約 0.68s 経過時点で周波数は 60Hz から 57Hz に達する。これに対し、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ は 0.55s であるため、その差分は約 0.13s である。周波数変動開始から $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ が経過した後も ΔT は緩やかに増加し誤差要因となるが、その時間が 0.15s と短いため、RoCoF 耐量算出値と Y 法用 PV モデルの乖離も小さいものと考えられる。

[グループ N]

周波数変化率が 0.580Hz/s の場合、周波数変動を開始してから約 5.2s 経過時点で周波数は 60Hz から 57Hz に達する。これに対し、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ は 0.33s であるため、その差分は約 4.8s である。周波数変動開始から $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ が経過した後も ΔT は緩やかに増加し誤差要因となるが、その時間が 4.8s と長いため、RoCoF 耐量算出値と Y 法用 PV モデルの乖離が大きくなったものと考えられる。

[グループ H]

周波数変化率が 0.0338Hz/s の場合、周波数変動を開始してから約 88.8s 経過時点で周波数は 60Hz から 57Hz に達する（シミュレーション時間は周波数変動開始から 20s で打ち切り）。これに対し、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ は 10.2s であるため、その差分は 9.8s である。周波数変動開始から $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ が経過した後も ΔT は緩やかに増加し誤差要因となるが、周波数の変化速度が非常に緩やかであるため、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ 経過後の ΔT の増加も非常に緩やかである（この傾向は図 2.1 から確認できる）。このため、グループ H の場合は誤差要因の影響度合いが相対的に小さいことにより、RoCoF 耐量算出値と Y 法用 PV モデルの乖離が小さくなったものと考えられる。

[グループ S]

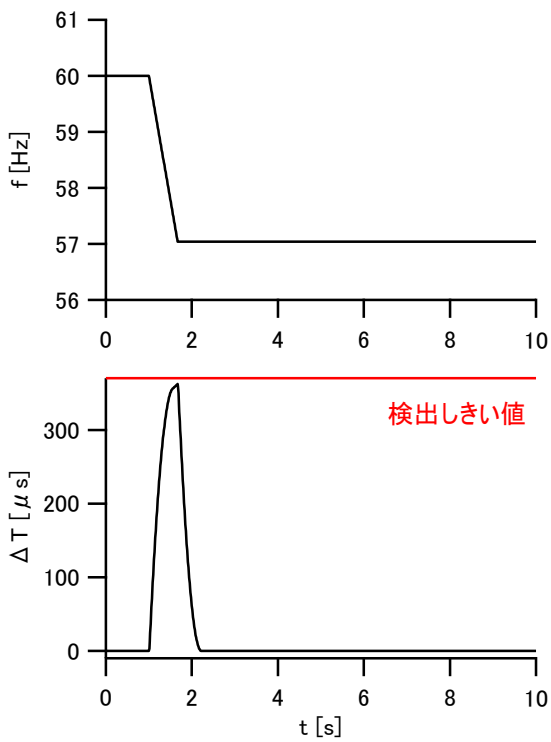
グループ N と同じ考察になる。周波数変化率

が 0.862Hz/s の場合、周波数変動を開始してから約 3.5s 経過時点で周波数は 60Hz から 57Hz に達する。これに対し、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ は 1.10s であるため、その差分は約 2.4s である。周波数変動開始から $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ が経過した後も ΔT は緩やかに増加し誤差要因となるが、その時間が 2.4s と長いため、RoCoF 耐量算出値と Y 法用 PV モデルの乖離が大きくなったものと考えられる。

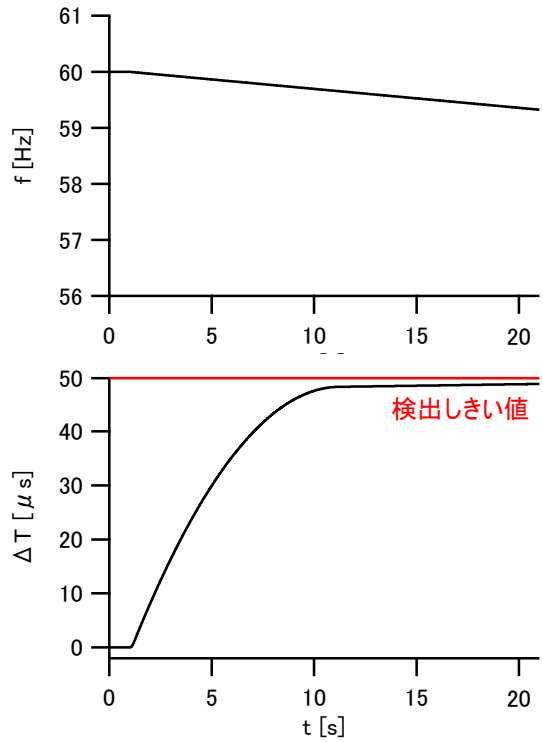
以上の考察から、ここでの誤差要因は次のように整理できる。

- $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ が経過した後の ΔT の増加の程度による誤差。周波数変化率が大きいほど、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ 経過後の ΔT の増加の程度も大きくなる。
- 周波数が下げ止まるまでの時間（ここでは基準周波数 60Hz の場合、下限を 57Hz に設定）と、 $t_{\text{過去}}+t_{\text{保持}}$ の差分による誤差。ここで生じた差分の時間だけ、上記で述べたように ΔT は増加する。

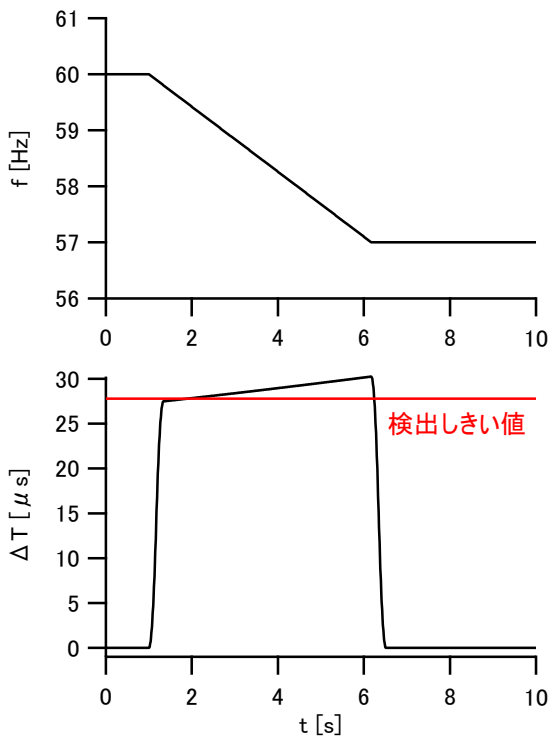
なお、(2.5) 式において $(df/dt)^2$ 項を除く線形化による誤差も考えられるが、その誤差による影響は、周波数変動レベルの誤差として反映される。このため、上記で述べた誤差は (2.5) 式における線形化の誤差の有無に関わらず生じるものと考えられる。



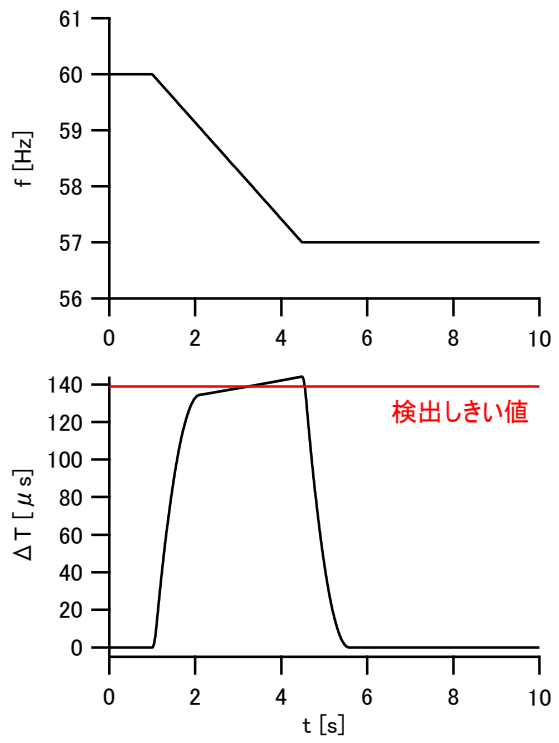
(a) グループ B



(c) グループ H



(b) グループ N



(d) グループ S

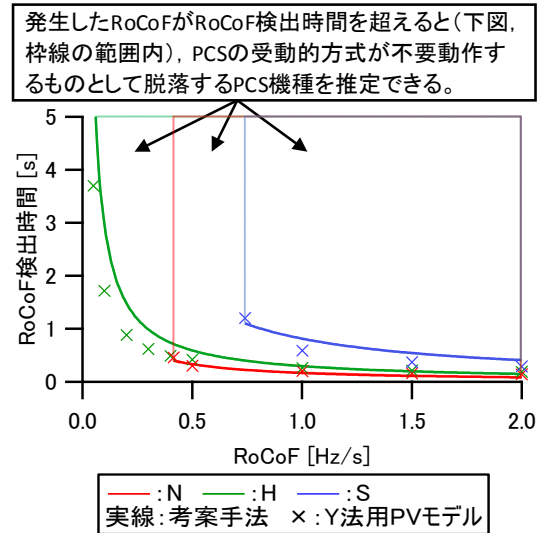
図 4.2 97%値の周波数変動に対する ΔT の例 (60Hz)

次に、RoCoF 検出時間の妥当性について検証する。RoCoF 耐量が 2Hz/s 以下と算出されたグループ N, H, S に対し、各種 RoCoF を与えた場合の RoCoF 検出時間について、(2.6) 式による関係と Y 法用 PV モデルの動作を図 4.3 に示す。なお、(2.6) 式における RoCoF 耐量は (2.5) 式により算出した値を用いている。図 4.3 より、RoCoF 耐量以上の周波数変化率が生じた場合であっても、考案手法による RoCoF 検出時間が概ね妥当であることを確認した。

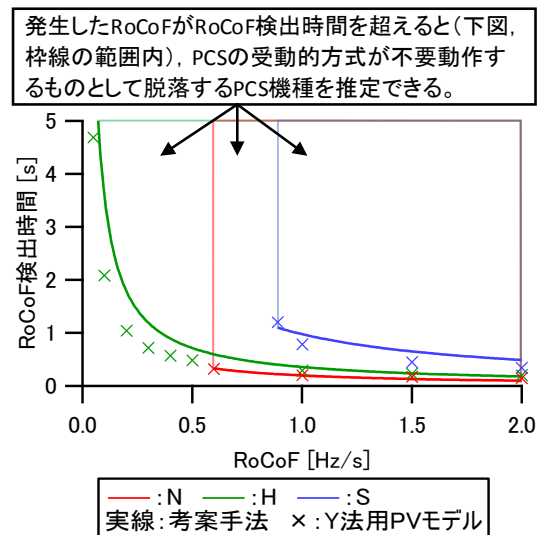
また、図 4.3 は PCS 機種毎の脱落領域を表している。すなわち、RoCoF および RoCoF 検出時間が図中の枠線内に入ると、その機種の受動的方式が不要動作するものとして、脱落する機種を簡易的に推定することが可能である。このため、PCS 機種毎に図 4.3 のような脱落領域をあらかじめ求めておけば、シミュレーションによらず、ランプ状の周波数変動のレベルおよびその継続時間に対して脱落するおそれのある PCS 機種を効率的に把握できる。また、本手法により求めた PCS 機種毎の PV 脱落領域は、各機種の分布および日射量による出力予測などの情報と組み合わせることで、周波数変動が生じた場合の PV 脱落「量」を簡易的かつ高速に推定することにも活用可能と考えられる。

5. おわりに

本研究では、単独運転検出機能の設定値から RoCoF 耐量および RoCoF 検出時間を求める手法を考案した。本手法の妥当性は、代表機種について Y 法用 PV モデルの動作と対比することにより確認できた。PCS メーカーからの情報提供などにより、FRT 非対応機種の単独運転検出機能、特に受動的方式の詳細な設定値がわかれば、本手法を活用することで、ランプ状の周波数変動のレベルおよびその継続時間に対して脱落するおそれのある PCS 機種を効率的に把握できる。



(a) 50Hz



(b) 60Hz

図 4.3 提案手法による RoCoF 検出時間の妥当性検証結果

ただし、本手法は、PCS が検出する電圧位相跳躍が小さい条件 (PCS 機種毎に異なる $\Delta T_{しきい値}$ に対して、電圧位相跳躍による ΔT の増加が十分小さい場合を指す) において適用可能な手法である。すなわち、事故点から PCS 連系点までの電氣的距離が短いほど、また、単独運転検出機能の $t_{最近}$ が短いほど、PCS が検出する電圧位相跳躍は大きくなる傾向があるため、このような条件下では電圧位相跳躍による脱落の可能性も別途シミュ

レーション等により確認する必要がある。

参考文献

- [1] 白崎, 天野. 大電源脱落時の周波数安定性と PV 脱落に関する基礎検討. H29 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会. PE-17-079 / PSE-17-079. 2017 年 9 月
- [2] All Island TSO Facilitation of Renewables Studies. EIRGRID and SONI. 2010.4
- [3] 各単独運転防止方式の概要.
<https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fukusudai/kenshutsu.html>
(2018 年 1 月 9 日閲覧)
- [4] 過去の EPPS 動作実績. 電力広域的運営推進機関. 第 11 回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会 配布資料.
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2016/files/chousei_jukyu_11_04_sankou2.pdf
(2018 年 1 月 29 日閲覧)
- [5] 白崎, 北内. 再生可能エネルギー大量導入時の各種系統条件が基幹系統の系統安定度に及ぼす基本的な影響. 電中研報告書 R14013. 2015 年 8 月

IR

CRIEPI

**Central Research Institute of
Electric Power Industry**

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
システム技術研究所長
神奈川県横須賀市長坂2-6-1
電話 046 (856) 2121 (代)
e-mail serl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

ISBN978-4-7983-1668-0

