

『電気協同研究』第74巻第2号

変電機器の耐震設計最適化

平成30年11月2日
一般社団法人 電気協同研究会

【発刊に際しての委員長推薦のことば】

変電機器の耐震設計最適化専門委員会
委員長 鈴木 克巳

現在、国内における変電機器の耐震設計は、民間規格である JEAG 5003「変電所等における電気設備の耐震設計指針」に基づき実施されている。同指針は1978年の宮城県沖地震の被害経験などで電気設備の耐震性に対する社会的関心が高まるなか、地震被害に伴う著しい電力の供給支障をきたさないことを目的として制定されており、今日では全国の標準的な変電機器の耐震設計指針として広く採用されている。2011年3月11日には、三陸沖を震源とし、地震の規模はマグニチュード9.0という日本における観測史上最大の地震となる東北地方太平洋沖地震が発生したが、変電機器の被害に伴う著しい供給支障は発生しておらず、現行指針については妥当性があり、規定内容を直ちに見直す必要はないものと評価がなされている。

一方で、東北地方太平洋沖地震で得られた知見を含め、地震動および地震動による被害実績のデータの蓄積を図り、必要に応じ民間設計基準の検討を進める必要性についても言及されており、変電機器の更なる耐震性向上のため、耐震設計最適化に向けた検討が望まれた。

そのため、従来は主にかいし・がい管に着目した擬共振法での耐震設計が合理的とされてきたが、近年ではがいし以外の部位にも被害が見られること、また国内外の耐震規格においても応答スペクトルに基づく設計手法が主流となっている現状を鑑み、本研究報告では応答スペクトルに基づく設計手法の採用をはじめとした、変電機器の耐震設計の最適化と解析評価技術の高度化を目的とし、その研究内容および成果を提言する。今後は本研究成果を使用者・製造者共通の認識とし、各社の実績を踏まえ、より適切かつ合理的な耐震設計の検討に採用されたい。

本書は、応答スペクトルに基づく変電機器の耐震設計に関する最新の内容を幅広く記載しており、電力会社の変電設備に携わる方々や変電機器の製作メーカーの方々をはじめ、より多くの皆さまに広くご活用いただくことを切に願うものである。

【主な記載内容】

本研究報告書は7編から構成している。

第Ⅰ編「総説」では、委員会設立の経緯および研究の経過と概要を示すとともに、本研究の研究成果について要点をとりまとめている。

第Ⅱ編「耐震設計の現状および東北地方太平洋沖地震を踏まえた課題」では、耐震から見た変電機器の特徴および前述の JEAG 5003「変電所等における電気設備の耐震設計指針」について、規定内容の概要およびその背景について記載しており、東北地方太平洋沖地震における変電機器の被害などから、現行指針の規定内容についての評価もとりまとめている。また、東北地方太平洋沖地震より得られた知見および検討課題を整理している。

第Ⅲ編「耐震設計最適化に向けた耐震関係規格調査および実態調査」では、国内外の耐震設計に関する規格について調査を実施しており、その結果について整理している。

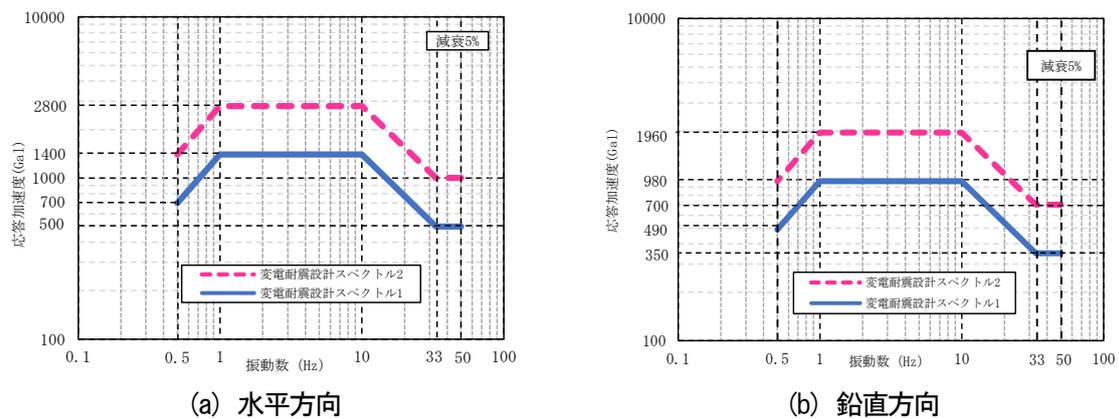
また、海外規格での規定事項の採用要否など、より最適な耐震設計の検討に必要な事項を整理するため、電力10社と電源開発株式会社の計11社が保有する変電所、開閉所、水力発電所に設置されている変電機器に関し、地震による被害状況や地震への対策、地震に関する設計・評価手法等の実態について調査した結果をとりまとめている。

第Ⅳ編「新たな設計地震力の検討および耐震設計手法」では、単純ながいし形機器のような単一の振動数に対し効果を発揮する従来の擬共振法ではなく、幅広い振動数範囲を合理的に評価可能な加速度応答スペクトルでの設計地震力の提案を近年観測された実地震の記録等をもとに実施し、応答スペクトルとして新たに変電耐震設計スペクトル1と変電耐震設計スペクトル2を設定し、設計地震力とした耐震設計手法および許容応力の考え方を記載している。提案する耐震設計に用いる地表面設計地震力をまとめると、表1および図1のとおりである。

表1 設計用加速度応答スペクトル（地表面）

スペクトル名称	変電耐震設計 スペクトル1	変電耐震設計 スペクトル2
加速度レベル (水平)	現行指針相当 ZPA : 500Gal 最大応答* : 1400Gal	現行指針の2倍相当 ZPA : 1000Gal 最大応答* : 2800Gal
加速度レベル (鉛直)	水平の0.7倍 ZPA : 350Gal 最大応答* : 980Gal	水平の0.7倍 ZPA : 700Gal 最大応答* : 1960Gal
振動数範囲	最大応答加速度の範囲 : 1~10Hz スペクトル範囲 : 0.5~33Hz (33Hz以上はZPA値を適用する)	
使い分け	地域性(国や自治体から公表される想定地震動など)や設備の重要性、信頼性などを勘案し選択する	

* ; 減衰定数5%における応答加速度値



第1図 変電耐震設計スペクトル（地表面）

第V編「動的設計の最適化に向けた設計条件の解析評価」では、応答スペクトルに基づく設計手法における最適な設計条件の検討のため、設計諸条件の解析評価を実施し、その結果を整理している。解析による評価項目を表2に示す。

表2 解析による評価項目

評価項目	目的
擬共振法との差異	擬共振法（現行指針）と応答スペクトルに基づく設計手法の機器応答の差異分析
加振方向の影響	鉛直動・加振軸数の影響
位相特性の影響	評価に適切な試験波形の提言
解析手法の差異	時刻歴解析および応答スペクトル法の評価結果の差異分析

第VI編「解析結果等を踏まえた耐震設計最適化」では、前編までの内容を踏まえ、耐震設計最適化に向けた提案事項をとりまとめている。まず始めに第IV編で提案した設計地震力と、第V編の解析評価結果を踏まえた動的設計の具体的事項についての提案を記載している。例として、本電協研で提案する動的設計に関する事項を表3および表4に示す。次に、近年の静的設計機器の被害状況を基に静的設計に関する提言を記載しており、最後に、現行機器の設計裕度の検討を実施し、耐震対策についてとりまとめている。

表 3 動的設計地震力

項目	JEAG 5003	動的設計地震力の提案内容		
		水平	鉛直	備考
①ベースとなる設計地震力 (地表面)	共振正弦 2 波 3m/s ² 突印 (水平) 最大応答: 1410Gal	変電耐震設計スペクトル 1 ZPA : 500Gal 最大応答: 1,400Gal	変電耐震設計スペクトル 1 ZPA : 350Gal 最大応答: 980Gal	<ul style="list-style-type: none"> ・スペクトル 1,2 は地域性 (想定地震動など) や設備の重要性, 信頼性などを勘察し選択 ・数値は減衰 5% (最大応答加速度は減衰定数に応じ換算係数αを乗じる*)
	—	変電耐震設計スペクトル 2 ZPA : 1,000Gal 最大応答: 2,800Gal	変電耐震設計スペクトル 2 ZPA : 700Gal 最大応答: 1,960Gal	
②基礎等による増幅倍率	がいし形機器: 1.2 変圧器ブッシング: 2.0 (水平のみ)	がいし形機器: 1.2 変圧器ブッシング: 2.0	がいし形機器: 1.2 変圧器ブッシング: 1.2	<ul style="list-style-type: none"> ・機器固有振動数での加速度応答スペクトル比 (基礎・変圧器上面/地表面) ・がいし形機器はアルミパイプ母線含む
③不確定要因 (鉛直加速度)	③の 3 項目合計で 1.1 (水平)	①ベースとなる設計地震力として同時に考慮		・水平加速度の 0.7 倍
③不確定要因 (実地震との差)	※鉛直加速度は必要に応じて水平加速度の 1/2 を単独で考慮する	考慮不要		・実地震データの分析結果を用いているため, 考慮不要
③不確定要因 (接続導体)		地震力による発生応力に対して 1.1 倍		・ブッシングおよびがいしのみ考慮
設計地震力 (機器入力)	増幅倍率, 不確定要因を考慮し共振正弦 3 波に換算 がいし形機器: 機器架台下端 共振正弦 3 波 3m/s ² 変圧器ブッシング: ブッシングポケット下端 共振正弦 3 波 5m/s ²	①ベース設計地震力 × ②基礎等による増幅倍率		・がいし形機器はアルミパイプ母線含む

表 4 提案する動的設計手法

項目	JEAG 5003	提案する動的設計手法				
		解析		試験	備考	
手法	擬共振法 (時刻歴)	応答スペクトル法 【推奨手法】	時刻歴モーダル 応答解析	時刻歴直接積分 応答解析	—	・設計標準としては 応答スペクトル法を推奨
設計地震力 (入力波形)	共振正弦 3 波 3m/s ²	変電耐震設計 スペクトル	模擬地震動 推奨波形: 電協研推奨波 (x, y, z 3 成分)		模擬地震動 推奨波形: 電協研推奨波, 加振用例示波 (x, y, z 3 成分) ハイパスフィルター適用可	<ul style="list-style-type: none"> ・設計標準化のため推奨波形 1 種を提供 ・フィルター条件は IEEE693 準拠
適合度	記載なし	—	0%以上 (入力)		-10~50% (IEEE 693 条件準拠) (加振台出力)	<ul style="list-style-type: none"> ・加振台出力が条件を満たさない場合は協議 ・変電耐震設計スペクトル 2 の試験は応力補正を許容
加振軸数	1 軸 x, y, (z) 単軸	原則 3 軸 (x-y-z), ただし協議により ・水平 1 軸と鉛直の 2 軸も可 ・機器構造上影響がないと判断できる場合, 鉛直も省略可		水平 1 軸と鉛直の 2 軸 (x-z, y-z)	<ul style="list-style-type: none"> ・海外規格や実現象を考慮 ・国内の加振装置の実態を考慮 	
加振軸方向の加算	記載なし 通常単軸であり, 加算なし	SRSS 法 組み合わせ係数法	同時加振 SRSS 法 組み合わせ係数法		同時加振	・組み合わせ係数法における係数は 0.4 とする
モードの合成法	記載なし	CQC 法を推奨 (SRSS 法も可)	代数和法	—	—	・有効質量比は 90%以上考慮 (協議により低減可能)

第Ⅶ編「センタークランプ方式ブッシングの解析手法高度化」では、東北地方太平洋沖地震におけるセンタークランプ方式ブッシングの実被害を見ると、解析結果と不整合である事例が確認されていることから、センタークランプ方式ブッシングの口開き挙動に対する解析手法の高度化が求められており、その解析手法の高度化について整理している。

以上のように本書は、変電機器の耐震設計の最適化と解析評価技術の高度化についての研究成果をまとめた資料であり、より適切かつ合理的な耐震設計の検討において有益な知見となると考える。

以上