

最近の地震による変電設備の被害の特徴と耐震対策

朱 牟田 善 治¹

¹ 正会員 工博 (財) 電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

本論は、最近の地震による変電設備被害を調査し、今後の耐震対策上の課題を抽出することを目的とする。1993年釧路沖地震、1993年ノースリッジ地震、1994年北海道東方沖地震、1995年兵庫県南部地震を中心に、変電設備の被害と系統機能被害の特徴を整理する。これに対して、既往の耐震対策がどのように行われてきたのかを、個々の設備と系統運用の両面から明らかにする。その後、変電設備の被害とそれらの耐震対策について地震間、地域間比較を行いながら現状の耐震対策の問題点について考察する。

Key Words: seismic damage, substation components, seismic countermeasure, retrofit, seismic risk management, electric power system

1. はじめに

電力系統は、常時はもちろんのこと、地震時においても、その供給信頼性を確保するために、これまでに様々な耐震対策がとられてきた。しかしながら、最近の地震においても、電力系統には、供給支障を伴う被害が発生している。

本論では、電力系統とその構成要素である変電設備について、最近発生した地震による被害とその耐震対策を調査し、それらの耐震対策上の問題点を明らかにすることを目的とする。1993年釧路沖地震（以下、釧路沖地震と呼ぶ）、1993年ノースリッジ地震（以下、ノースリッジ地震と呼ぶ）、1994年北海道東方沖地震（以下、北海道東方沖地震と呼ぶ）、1995年兵庫県南部地震（以下、兵庫県南部地震と呼ぶ）、における変電設備被害の特徴を整理する。次に、個々の変電設備に行われてきた耐震対策について概説する。さらに、電力系統の機能被害とその耐震対策の現状を明らかにする。その後、変電設備の被害とそれらの耐震対策について地震間、地域間比較を行いながら、現状の耐震対策の問題点について考察する。

2. 変電設備の地震被害の特徴

(1) 最近の地震における変電設備被害の特徴

表-1は、1993年～1995年にかけて日米で発生した代表的な4つの地震の地震諸元を示す。表-2は、これらの

地震によって被害を受けた電力設備の被害総額と変電設備被害額を示す。4つの地震のうち、震度が最大なものは、兵庫県南部地震であり、震度7を記録している。被害額でも兵庫県南部地震がもっとも大きく約2260億円に達しており、そのうち変電設備被害は167億円であった。日本において変電設備被害の割合が被害総額に対してもっとも大きかったのは、釧路沖地震であり、約22%に達している。ノースリッジ地震の場合には、配電系統の被害は軽微であり、変電設備被害を多く含む送電系統の被害で、約99%にも達している。このように最近の地震において発生している電力設備の被害のうち、変電設備被害の占める割合は、地震や地域の特性によって大きな違いが見られる。以下には、個々の地震ごとにその変電設備被害の特徴を示す。

(2) 釧路沖地震^{1)~3)}

表-3は、主な変電設備の被害数とその被害率を示す。表中の母数とは、被害を受けた変電所の各変電設備の総数を示す。被害は軽微であったが北海道電力の309変電所のうち6変電所に生じた。図-1は、主に被害を受けた北海道釧路支店管内の送電系統図を示す。釧路支店管内の1次変電所（187kV）である東釧路変電所、宇円別変電所の変圧器が故障する重大事故が発生し、釧路支店管内系統全体が一時、全停となった。特に、宇円別変電所での被害が大きく、187kVから66kVに変圧する3台の変圧器のうち、連絡用変圧器（バンク）2台に、被害が生じた。両変圧器とも変圧器本体とトラックベースを連結する固

表-1 地震諸元

名称	1993年釧路沖地震	1994年ノースリッジ地震	1994年北海道東方沖地震	1995年兵庫県南部地震
発生年月日	1993年1月15日	1994年1月17日	1994年10月4日	1995年1月17日
震源位置	北緯42度51分 東経144度23分	北緯34度13分 西経118度32分	北緯43度22分 東経147度40分	北緯34度06分 東経135度00分
震源深さ	107km	19km	30km	20km
震源マグニチュード	7.8	6.7	8.1	7.2
最大震度	6(JMA)	9(MM)≒6(JMA)	6(JMA)	7(JMA)

表-2 復旧費用 (千円)

名称	1993年釧路沖地震	1994年ノースリッジ地震	1994年北海道東方沖地震	1995年兵庫県南部地震
変電設備	196,700	13,800,000*	88,000	16,700,000
総額	901,030	13,844,000	1,247,080	226,000,000

注: ノースリッジ地震では、1\$ = 100円として換算。*: 変電設備以外の送電システムの被害を含む

表-3 釧路沖地震による主要変電設備の被害

名称	被害数	母数	被害率(%)
変圧器	5	19	26
遮断器	2	152	1.3
断路器	5	240	2.1
避雷器	0	29	0

表-4 ノースリッジ地震による主要変電設備の被害

名称	被害数	母数	被害率(%)
変圧器	62	269	23
遮断器	24	493	4.9
断路器	215	751	28.6
避雷器	36	119	30.3

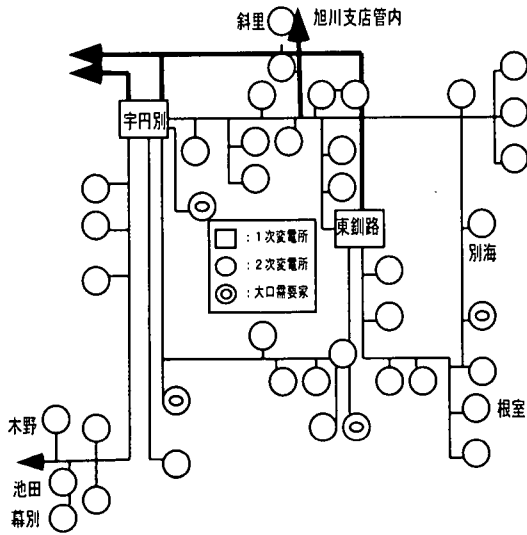


図-1 北海道電力釧路支店管内送電系統図

定ボルト折損により、変圧器本体が滑動した。その他、断路器の碍子が破損するなどの被害が生じた。

(3) ノースリッジ地震^{(4)~(6)}

サンフェルナンドバレーの北西部を中心に、震源に近い変電所に多大な被害が生じた。図-2は、ロスアンゼルス市水道電力局の送電系統図を示す。表-4は、主に被害を受けたシルマー (Sylmar) 交直変換所、リナルディ (Rinaldi) 変電所、パーディ (Pardee) 開閉所、

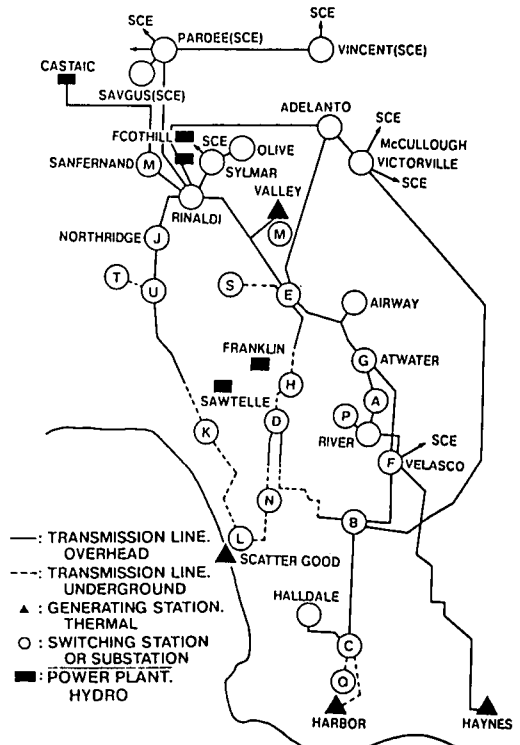


図-2 ロスアンゼルス水道電力局 (DWP) 管内送電系統図 (文献5) からの引用

ヴィンセント (Vincent) 変電所、ソーガス (Saugas) 変電所、カスティック (Castaic) 発電所、E、J、U、

表一5 北海道東方沖地震による主要変電設備の被害

名称	被害数	母数	被害率(%)
変圧器	0	11	0
遮断器	1	85	1.2
断路器	2	143	1.4
避雷器	0	17	0

表一6 兵庫県南部地震による主要変電設備の被害

名称	被害数	母数	被害率(%)
変圧器	52	188	27.0
遮断器	10	689	1.5
断路器	41	1948	2.0
避雷器	15	373	4.0

表一7 変電設備耐震設計の変遷 (文献22) に加筆

年号	昭和											平成																						
	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	1	2	3	4	5	6	7	8	9
西暦	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
大規模地震	新潟 (M7.5) ▽		十勝沖 (M7.9) ▽					サンフェルナンド (M6.4) ▽				宮城県沖 (M7.4)				日本海中部 (M7.7)				兵庫県南部 (M7.2) ▽				釧路沖 (M7.8) 北海道南西沖 (M7.8) ▽				三陸はるか沖 (M7.5) 北海道東方沖 (M7.5) ▽						
機 器	変圧器類											本体 静的 (0.5G)																						
	静的 (0.5G)											ブッシング 動的 (0.5G共振正弦3波)																						
設計 指針等	碍子形 機器類											静的 (0.5G)											動的 (0.3G共振正弦3波)											
	地震被害の 多発に伴う 動的設計の 必要性提言											500kV システムの導入 に伴う動的 設計の採用											○「変電機器の耐震設計」 ¹⁵⁾ ○JEAG-5003「変電所等における耐震対策指針」 ¹⁷⁾ ○「変圧器ブッシングの耐震設計」 ¹⁸⁾ ○「変電機器間リード線の耐震対策」 ¹⁹⁾ ○「大口径アルミパイプ母線」 ²⁰⁾											
											大型加振器による検証の実施																							

T変電所の設備数を母数として、設備別被害総数とその被害率を示す。特に、被害を受けた変電設備のうち、変圧器、遮断器、断路器に代表される碍子系設備に被害が多かった。

(4) 北海道東方沖地震^{9), 10)}

表一5は、主な変電設備の被害数とその被害率を示す。表中の母数は、被害を受けた変電所の各変電設備の総数を示す。被害は、釧路沖地震と同様に、釧路支店管内で発生し、4変電所に生じた。具体的には、宇円別変電所で66kV母線の短絡と素線の一部のアーク溶断、斜里変電所で33kV遮断器ブッシング破損、根室変電所で断路器のブレード傾斜、別海変電所で断路器の碍子の傾斜などがあった。

(5) 兵庫県南部地震^{11)~13), 22)}

表一6は、主な変電設備の被害数とその被害率を示す。表中の母数は、被害を受けた50変電所の各変電設備の総数を示す。本地震による変電設備の被害は、関西電力管

内の全変電所861箇所の内、伊丹変電所、新神戸変電所、神戸変電所、西神戸変電所などの超高圧変電所をはじめ、軽微な被害を含めると50変電所180設備に及んだ。被害状況は、表中に示すとおり、主要変圧器52台、主要遮断器10台、断路器41台、避雷器15組などである。被害の主なものとしては、主要変圧器では基礎アンカーボルト破断による変圧器本体の滑動が17台、主要遮断器では、ブッシングずれによる漏油が8台、断路器では支持碍子の折損が22台、避雷器では絶縁ベース碍管折損による倒壊が8組発生した。軽微なものまで含めると多数の設備に被害があったものの、変電所機能に影響を与える設備の被害は、主要変圧器、主要遮断器、断路器、および避雷器のみでありその被害モードも限定されていた。

3. 変電設備に対する耐震対策

(1) 変電設備の耐震設計の歴史

1964年の新潟地震、1968年十勝沖地震、1978年の宮城県沖地震などの地震被害を契機として、変電設備の耐震

表一八 変電設備の耐震対策具体例（文献15）を参照

機器名	耐震対策例
空気遮断器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 頭部重量の低減 2. ステー碍子の取り付け 3. 機器と架台間へ防振ゴムを入れる 4. フリクションハンマーの採用 5. 架台および基礎の補強による剛性の向上 6. 締め付けボルト部の点検および耐震ボルトの取り付け
断路器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高強度碍子の使用 2. ステー碍子の取り付け 3. 本体ベースと架台の間に金属緩衝剤を入れる 4. 架台および基礎の補強 5. 頭部重量軽減のため導電部分のアルミ化
変流器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 補強碍管の使用 2. 下部タンクおよび架台の補強 3. 頭部重量の低減 4. 本体ベースと架台の間に金属緩衝剤を入れる
避雷器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 機器とベースの間へ防振ゴムを入れる 2. 機器とベースの間へ血バネを入れる 3. フリクションハンマーの採用
変圧器	<ol style="list-style-type: none"> 1. ブッシングの耐震強度向上 2. 地震検出リレーの設置による保護リレーの誤動作防止 3. 冷却器と本体を共通ベースとする 4. 配管接続部のフレキシブル化
アルミパイプ母線	<ol style="list-style-type: none"> 1. 三角錐支持碍子の適用 2. ハワ支持部へスライド機構を設ける 3. 傾斜V吊り方式の採用

設計法に数多くの変更が加えられ今日の耐震設計基準が確立した。表一七は、変電設備耐震設計の変遷を示している。従来、変電設備の耐震設計には、静的設計手法（震度法）が用いられており、水平加速度0.5Gを静的に加え、この応力に耐えることができるように設計されたものが多かった。しかし、その後の1964年新潟地震などで碍子系機器に被害が生じたため、その対策として地震波による機器の共振現象を考慮した動的設計手法が主に空気遮断器を対象に取り入れられるようになった。さらに、1973年以降の500kV設備の導入にあたっては、従来にもまして高信頼度化が要求されると共に、設備が格段に大型化された。このため、土木・建築分野の動的解析手法および数多くの実加振試験結果を参考にして、「共振正弦3波0.3G架台下端突印」を条件とする動的設計手法が各電力会社で採用されるようになった。

その後、1978年に発生した宮城県沖地震による被害は、275kV変圧器ブッシングの破損など従来経験のないものを含んでいた。このため、電気事業連合会、電気協同研究会において、変電設備の動的耐震設計が検討された。この検討により、1980年に電気技術指針（JEAG5003）が確立されるに至り、今日、標準的な変電設備の耐震対策指針として広く採用されている。

なお、JEAG5003が出版された約2年後に、同指針を補足するために、電気協同研究会により、「変圧器ブッシングの耐震設計」¹⁸⁾、「変電機器間リード線の耐震対策」¹⁹⁾、約3年後に「大口径アルミパイプ母線」²⁰⁾などが報告され、今日規定されている変電設備の耐震対策指

表一九 釧路沖地震以降に行われた耐震対策

該当機器	台数	機器の問題点	対策
連絡用変圧器	1	・ブッシング強度不足	ブッシング取り替え
配電用変圧器	1	・基礎ボルトの強度不足	基礎部防振ゴム機能のロック
電力用蓄電池	1	・支持碍子の強度不足	取り替え
	5	・支持碍子の強度不足	斜め碍子の追加
遮断器	71	・腹材の強度不足	架台腹材の追加

針がすべて確立された。

JEAG5003は、170kV超過の変電設備を対象としているが、実際には、同指針を170kV以下の変電設備の耐震対策として採用している電力会社は多い。たとえば、北海道電力の場合、JEAG5003が出版された1980年12月以降、同指針を全ての電圧階級に適用することとし、標準購入仕様書の耐震強度の全面見直しを実施した。さらに、1982年11月に「変圧器ブッシングの耐震設計」¹⁸⁾が報告された以降には、これまで耐震構造ブッシングが製造されていなかったが、それ以降には耐震構造ブッシングを採用するようになった。

(2) 既存の変電設備に対する耐震対策

既存の変電設備の耐震対策としては、①地震動との共振を避ける方法、②部材を強化する方法、③発生応力を下げる方法などがある。新設する以外に設備の固有振動数を大幅に変化させることは困難であることから、一般に①による方法をとることは難しく、通常は、②や③の方法が多くとられる。②の部材を強化する方法には、a) 碍子の強化、b) ステー碍子の取り付け、c) 架台、基礎の強化、d) 頭部重量の軽減などの方法がある。③の発生応力を下げる方法には、a) 減衰を増加させる方法、b) 碍子に発生する曲げ応力を小さくする方法、などがある。

表一八は、設備別の耐震対策具体例を示す。なお、いくつかの文献¹⁴⁾¹⁵⁾では耐震対策の効果が定量的に示されている。

以下には、地震後に各電力会社によって行われた耐震対策について概観する。

(3) 釧路沖地震後の耐震対策

釧路沖地震で被害を受けた変電設備は、1980年以前に設置された現行の耐震基準に準拠していなかった。このため、北海道電力では、釧路沖地震で被害のあった設備を中心に、以下のような耐震対策を実施した。

表一九は、釧路沖地震以降に北海道電力で耐震補強として計画された設備とその実施状況を示す。以下には代表的な耐震対策例について示す。

釧路沖地震で被害を受けた変電所に関しては、主に、変圧器本体のロッキング防止のため、基礎ボルト部を防振ゴムを使用しない構造に改造したり、ブッシングを耐

表-10 DWP における変電設備の耐震設計基準の経緯 (文献5) からの引用)

	1971年以前	1971年～1994年	1994年以降
改訂の原因となった地震		サンフェルナンド地震 (M6.4)	ノースリッジ地震 (M6.8)
設計水平加速度 (G)	0.2	0.5	0.5 (121.5kV超過) 0.4 (それ以外)
設計上下加速度	なし	水平加速度の4/5	0.5 (121.5kV超過) 0.4 (それ以外)
動的設計の適用の範囲	なし	固有振動数30Hz以下の機器に対して動的設計を行う	121.5kV超過の機器を対象
設計地震波及び解析法	(1) 擬似静的法 (2) 係数法	解析ないしは実験、または両者を併用 【解析法】 (1) Modal Spectrum Analysis (Dynamics Spectra) (2) 時刻歴解析【実験法】 0.1～0.2gの振動振幅による定常実験により共振点を見出し、その共振振動数にて(1)15波連続加振、(2)10Sine Beat加振のいずれかを行う	解析ないしは実験、または両者を併用 【解析法】 (1) Modal Spectrum Analysis (UBC Spectra) (2) 時刻歴解析【実験法】 0.1～0.2gの振動振幅による定常実験により共振点を見出し、その共振振動数にて(1)15波連続加振、(2)10Sine Beat加振のいずれかを行う

震構造のものに取り替えたりした。特に、釧路沖地震時に宇円別変電所の変圧器の固定ボルトが折損した。このため、地震直前には、固定されずに台車に乗っていた変圧器本体を、台車ごと基礎部に固定するという耐震補強を行った。

また、表-9中の遮断器に関しては、現行の設計地震力が遮断器に作用した場合、その架台腹材に作用する応力が腹材の許容応力基準を上回ることから腹材の補強が必要となった。そのため、北海道電力では、①腹材の追加と、②新架台への取り替え、という2つの案が計画されたが、台数が多く多額の費用を必要とすることから、安価である腹材の追加による耐震補強のみを実施した。

さらに、計器用変流器や計器用変圧器では、現行の設計地震力が当該設備に作用した場合、支柱材に作用する応力、腹材に作用する応力が許容応力基準を上回ることが判明した。しかし、支柱材の補強が不可能だったため、架台自体を新架台に交換することが実施された。

(4) ノースリッジ地震後の耐震対策

ノースリッジ地震で最も被害を受けたのは、ロスアンゼルス市の全域を主な供給エリアとするロスアンゼルス市水道電力局 (DWP) であった。同地域には、1971年にサンフェルナンド地震が起きており電力設備に多大な被害が生じている。DWPでは、1971年のサンフェルナンド地震後に静的荷重のみを考慮していた変電設備の耐震設計に動的設計が採用されるようになった。ノースリッジ地震後には、このうち、Modal Spectrum analysis (応答スペクトル法) で利用される設計用加速

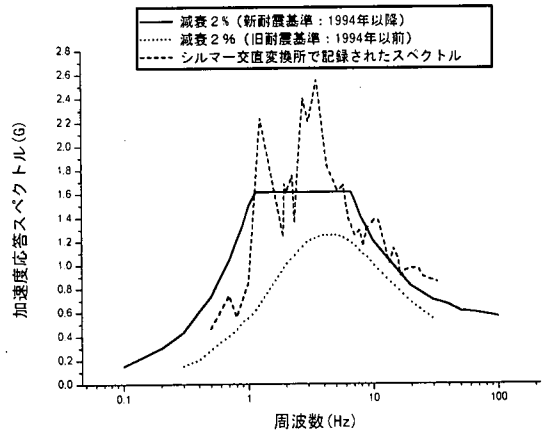


図-3 DWPの変電設備耐震設計用の加速度応答スペクトルの新旧比較 (文献8) を参照)

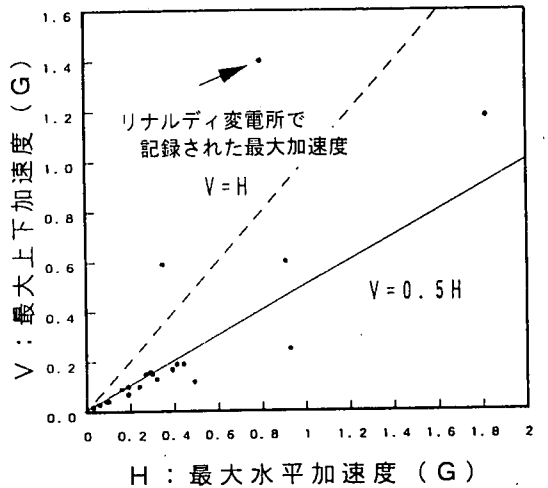


図-4 水平動と上下動の最大加速度の関係 (文献5) からの引用)

度応答スペクトルが改訂された。表-10に、サンフェルナンド地震、ノースリッジ地震前後の変電設備の耐震設計法を比較して示す。

図-3は、ノースリッジ地震前後の減衰定数2%の設計用加速度応答スペクトルを示す。日本では、減衰定数5%の変電設備が一般的であるが、DWPでは、2%の変電設備が一般に、用いられている。また、同図は、ノースリッジ地震でシルマー交直変換所で記録された地震動の応答スペクトルも設計基準と比較するために示している。DWPでは、1994年6月23日に、138kV超過のAC (交流) 用設備、同年11月22日に138kV超過のDC (直流) 用設備の耐震設計基準を、1994年に改訂されたUBC (Uniform

Building Code)²⁰⁾に準拠するように改訂した。図中の新基準の応答スペクトルは、UBCで規定されている基準と一致している。新基準で定められた応答スペクトルは、50年以内に同基準の地震動を越える地震が発生する確率が10%以下であること、同基準で設定された地震力が設備に加わった場合、その破壊確率が2%以下であることとしている。

図-4は、ノースリッジ地震で観測された最大水平加速度と最大上下加速度の関係⁹⁾を示す。多くの観測点では、最大上下加速度は最大水平加速度の約1/2付近に分布しているが、リナルディ変電所などの数地点では、上下動の方が大きくなっている。このような結果を受けてDWPでは、新耐震設計基準では、上下動も水平動と同じ設計地震力を考慮するように改訂した。

DWPの場合、市営の公共機関であるため、連邦危機管理局 (FEMA) によって、復旧に関わる費用の多くが負担される。FEMAは、地震によって損傷したDWPの設備、または、損傷した設備のうち被害のなかった部分に関して、その改修費用 (現行設計基準に準拠することが目的) を、原則的に負担することになっている。ただし、地震で損傷しなかった旧基準の設備の補強や改修費用に関しては、ほとんどその費用負担を保証していない。

実際、ノースリッジ地震後にはFEMAから30万ドルの費用負担を受けて、DWPは、まず、121.5kV超過の設備に対して、地震後から約9カ月で緊急的な応急復旧を完了した。その後、被害を受けた設備の恒久的な改修のための作業が始まった。これらのための総費用は、84.8万ドル (応急復旧のための30万ドルを含む) に達するが、FEMAから支出された費用は66.1万ドルであった。残りは、DWPが負担した。一方、ノースリッジ地震で被害のなかった設備 (または、被害の軽微であった設備) に関しても、現行の耐震基準に準拠するように121.5kV超過の設備を改修することが計画された。このための費用として、65.8万ドルが必要であると見積もられている。DWPでは、経済的な理由からこれらの設備に関する改修作業はほとんど実行していない。

(5) 北海道東方沖地震後の耐震対策

北海道東方沖地震後、変電設備の被害は軽微であったため、北海道電力では特に、現状復旧以外に耐震対策を行わなかった。なお、釧路沖地震後に耐震補強された設備に関しては、1年半後に起きた北海道東方沖地震で被害は報告されていない。

(6) 1995年兵庫県南部地震後の耐震対策

兵庫県南部地震においては、変電設備に多大な被害が生じ、資源エネルギー庁のもとに「電気設備防災対策委員会」が設置され、現行の変電設備における耐震設計基

表-11 兵庫県南部地震後に行われた既設設備に対する耐震対策 (文献12) からの引用)

対象設備数	対象数	対策の内容
変圧器	85	アンカーボルト対策
遮断器	1	碍子の補強対策
同上ブッシング	36	ずれ止め金具の設置対策
断路器	25	ブレースの追加対策
避雷器	30	ギャップレス避雷器への取り替え 架台の補強

準の妥当性が検討された¹²⁾。その結果、現行耐震基準は、設備の併用期間中に1~2度程度発生する確率を持つ一般的な地震動に対して、機能に重大な支障が生じない耐震性を確保しているものと評価された。

ただし、旧基準に基づき設計された設備や特殊な構造を有するものに、供給支障に至る被害が多くみられた。このため、旧基準設計の設備であって、全国の主要な系統を構成する170kV超過の変電設備については、順次、今後3年以内をめどに現行基準レベルの改修を行うことが必要であると結論された。また、その他の設備についても、今後設備更新の時期をとらえ、耐震性の高いものへの取り替え、架台の補強等を行うことが必要であると結論された。

表-11は、既存の設備に対して、関西電力が兵庫県南部地震発生後に行った耐震対策例を示す¹²⁾。以下には、具体的な補強対策について設備ごとに概説する。

a) 主要変圧器

主要変圧器に関しては、アンカーボルトの破断が多く確認された。これは、基礎ベースと本体プレートとの間にギャップがあるために、アンカーボルトに曲げ応力が発生し、引張応力、せん断応力との合成応力がボルトの許容応力を越えたためと考えられる。よって、アンカーボルトの破断防止対策が必要であり、基礎ベースと本体プレートとの間にスペーサを挿入し、ギャップをなくすことにより曲げ応力の発生を防止した。

b) 油遮断器

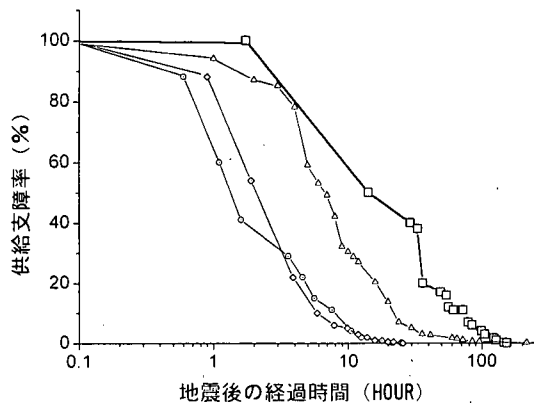
センタークランプ方式のブッシングを使用した遮断器に被害を多く受けた。ブッシングに対する曲げモーメントが復元モーメントを上まわり、接合部が口開きを繰り返すうちに碍管に芯ずれが生じ、接合部のシール効果が喪失し、全量が漏油に至ったものと考えられる。よって、油遮断器のブッシング芯ずれ防止対策として、碍管のずれを防止するための金具を設置した。

c) 断路器

地震動により発生する碍子基部の歪みが、許容歪みを上まわり、折損に至った例が多い。よって、①補強部材の追加により架台の剛性を強化し、支持碍子に発生する

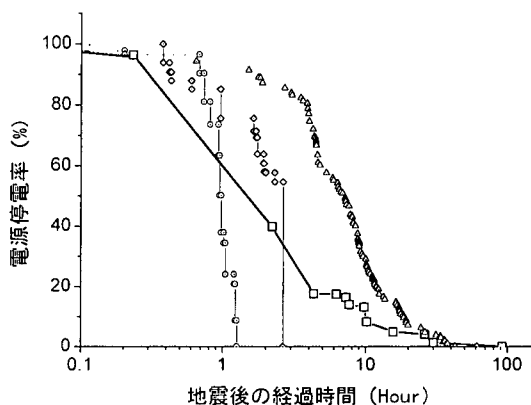
表-12 地震ごとの機能被害の比較

名称	釧路沖地震	ノースリッジ地震	東方沖地震	兵庫県南部地震
最大供給支障電力	43,320kW	1897MW	65,700kW	2,836MW
最大電源停電時間	2時間39分	61時間17分	1時間15分	26時間14分
最大停電時間	23時間23分	216時間以上	21時間16分	153時間
停電戸数	57,000戸	136万戸	46,411戸	260万戸



—□— 1995年兵庫県南部 (100%停電戸数：260万戸)
 —○— 1994年北海道東方沖 (100%停電戸数：4万6千4百戸)
 —△— 1994年ノースリッジ (100%停電戸数：136万戸)
 —◇— 1993年釧路沖 (100%停電戸数：5万7千2百戸)

図-5 最近の地震における供給支障率の比較



—□— 1995年兵庫県南部 (100%供給支障電力：2,836MW)
 —○— 1994年北海道東方沖 (100%供給支障電力：65,700kW)
 —△— 1994年ノースリッジ (100%供給支障電力：1,897MW)
 —◇— 1993年釧路沖 (100%供給支障電力：43,320kW)

図-6 最近の地震における電源停電率の比較

応力を低減させる、②支持碍子を許容歪みの大きい高強度碍子に変更し、碍子基部の発生歪みに対する裕度を確保した。

d) 避雷器

地震動により絶縁ベース碍管部に発生する曲げ応力が、許容応力を上まわり折損に至った例が多い。よって、①架台がある場合には補強部材の追加により架台の剛性を強化し、絶縁ベース碍管に発生する応力を低減させる、②耐震性の優れたギャップレス避雷器に取り替え、絶縁ベース碍管の曲げ応力に対する裕度を確保した。

4. 電力システムの機能被害の特徴

(1) 地震ごとの復旧効率

表-12は、4つの地震における最大供給支障電力、最大電源停電時間、最大停電時間、停電戸数を示す。電源停電とは、配電用変電所以上の送電系統の事故による停電を意味する。ただし、ノースリッジ地震の場合、電源停電と配電設備の被害による停電を厳密に区別した公の資料はない。しかし、配電設備の被害は、たとえば、木柱2本、柱上変圧器が92器を例として、かなり軽微であった。よって、本論では、ノースリッジ地震の場合、文献7)に基づき、配電用変電所が配電を再開するまでの時間を電源停電時間とした。釧路沖地震や北海道東方沖

地震と比べ、ノースリッジ地震と兵庫県南部地震は、はるかに大きな供給支障を系統に生じさせたことがわかる。

図-5は、地震時の供給支障率の推移を示している。図-6は、電源停電だけの供給支障率の推移を示している。供給支障率(電源停電率)は、地震直後の停電戸数(供給支障電力)を100%とした場合の各時間における停電戸数(供給支障電力)の割合(%)を示している。図-5は、停電戸数や最大停電時間が大きいほど、地震後の経過時間に対する供給支障率(以後、復旧効率と呼ぶ)が大きくなる傾向を示している。一方、図-5と図-6を比較してみると、ノースリッジ地震と兵庫県南部地震では、復旧効率が逆転している。このことは、配電設備被害の違いが、かなり復旧効率に影響することを示唆している。

図-6で注目すべきことは、被害規模が小さかった釧路沖地震や東方沖地震のほうが、兵庫県南部地震での復旧効率よりも地震直後の数時間では悪くなっていることである。このことは、送電系統の復旧効率が、被害規模だけでなく他の要因により、大きく影響されることを意味している。たとえば、系統のネットワーク構造や地域特性の違い(人工密度等)が、その要因として挙げられる。

(2) 地震時の供給支障事故

地震時には、電気的な異常を感知する継電器が働き、遮断器などの開閉設備が働いて停電となる。地震時の継電器は、電力設備に物理的な被害が生じた場合よりも、母線や鉄構間のジャンパー線の振動により発生する地絡や短絡時、継電器自体が強く振動した場合等に作動することのほうが、圧倒的に多い。たとえば、釧路沖地震の宇円別変電所の場合、66kV甲・乙母線ジャンパー線および66kV母線連絡用母線ジャンパー線が、横揺れおよび跳ね上がって母線を引き留めている鉄構ビームに接近したため、地絡、短絡事故に至った。これにより187kVおよび66kV母線保護継電器が動作して、関連遮断器を遮断したため、宇円別変電所が全停となった。また、地震の振動によって、木野変電所および池田変電所遮断器が、短絡回線選択継電器動作により遮断したため、池田変電所および幕別変電所が全停となった。北海道東方沖地震の場合、宇円別変電所の66kV送電線路上に短絡事故、66kV甲母線青相ジャンパー線と66kV乙母線赤相・白相ジャンパー線に地絡、短絡事故が発生し、全遮断器が作動した。これにより宇円別変電所から供給している6変電所と大口需要家に供給支障が発生した。また、池田変電所では、6.6kV配電線補助継電器の誤動作により供給支障が発生した。兵庫県南部地震の場合、設備被害以外で供給支障が発生した変電所が、180変電所にも達した。ノースリッジ地震の場合、負荷の急激な脱落により周波数継電器が作動して変電所が機能停止となる場合が多かった。このように4つの地震とも、電力系統に物理的な被害が生じなくても地震直後に、機能停止してしまう現象が起こっている。

なお、地震時の電気的な異常状態（潮流・周波数・電圧などの異常）を解消するために、電源制御・負荷制限・系統分離などが行われると、系統は一応安定となる（以後、系統調整と呼ぶ）。その後は、現場巡視を基本として、必要に応じて損傷設備の取り替えなどが行われ、供給支障が解消される（以後、物理的復旧と呼ぶ）。物理的な修復を伴わない系統調整は、物理的な修復を伴う復旧に較べて、一般に短時間で終了すると考えられるため、地震時の供給支障時間は、物理的な復旧時間に大きく左右されると思われる。しかしながら、実際には系統調整と物理的な復旧は同時並行的に行われるため、厳密に地震後の復旧状態を系統調整による復旧と物理的な復旧に分離することは難しい。

5. 電力系統としての耐震対策

電力系統は、変電所へ電気を供給するための送電線を2ルート化または連携したり、変電所の変圧器、母線等の設備を複数にするなどして、事故に対する信頼度を保

つようなシステム設計がなされている。日本においては、このようなシステム形成に関して、以下のような設備形成基準を設定している¹⁴⁾。

(1) 設備形成の考え方

設備形成基準は、電力系統の設備形成を行う上で確保すべき系統信頼度レベルを定めたもので、基本的な考え方は、以下のとおりとなっている。

a) 上位系統（基幹系統）

上位系では各社とも単一事故が発生しても供給支障が生じないことが基本となっている。また、安定度や電圧が適正に維持されることも基準に盛り込んでいる場合がある。

b) 下位系統（2次系統以下）

下位系では単一事故に対して短時間の供給支障は許容している場合が多いが、万一供給支障が発生した場合には、系統切り替えや配電線切り替えにより対処可能としている。

ここでいう単一事故とは電力設備のうち1単位（1器）に発生した事故をいい、その種類には送電線1回線事故、1バンク事故、片母線事故、発電機1台事故がある。また下位系も上位系とほぼ同様であるが、発電機1台事故を除いている会社もある。

これに対して、地震時のように多重事故が発生した場合を想定した設備形成基準はないが、基本的には運用により著しい供給支障を回避できるようになっている。

(2) 事故復旧の考え方

事故復旧とは本来、事故設備を修理して電力系統を事故発生以前の状態に戻すことをいい、事故復旧にかかわる系統操作の全部が事故時復旧操作である。しかし、事故復旧で最優先されるのは供給支障の解消であり、系統運用部門では実行可能な系統操作などにより使用不可能な設備を切り離し、供給支障を局限化しようとする。続いて設備管理部門が設備の修理を行うが、4(2)で述べたように通常その期間は長く続く。したがって、系統運用部門からみると系統の制約条件を満足し、供給支障を局限化した状態をもって一応の復旧状態となる。通常、系統運用部門が考慮している復旧状態とはここまでを示す。事故区間の復旧は、通常、上位、下位系統とも、現場巡視の結果などにより設備が使用可能と判断されたのち、給電指令により送電を再開する。

また、地震時のように供給支障が生じ、設備復旧を行わないと供給支障が回復しない場合などには、系統運用部門と設備管理部門が協力して復旧にあたるが、その際には、現場の技術者の経験的な判断が重要となる。

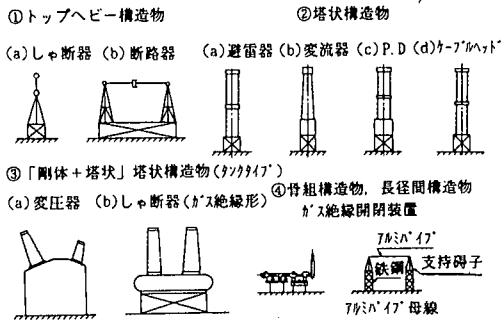


図-7 変電設備の構造タイプの分類 (文献5) からの引用

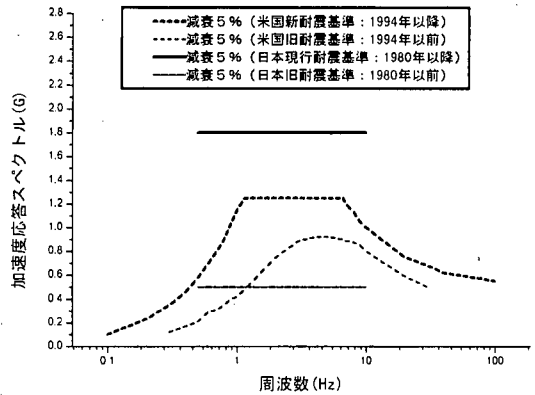


図-8 日米の変電設備耐震設計基準における地震力の比較

表-13 構造タイプごとの変電設備の被害

変電機器	構造タイプ	釧路沖地震被害モード	ノースリッジ地震被害モード	東方沖地震被害モード	兵庫県南部地震被害モード
変圧器	③	(1)フランジ部からの漏油 (2)アンカーボルト破断 (3)ブッシングずれ (4)本体絶縁油漏れ (5)配管ジョイント部ずれ (6)基礎傾斜	(1)ブッシング部の落下、破損、ずれ (2)基礎部の変形 (3)ジョイント部の損傷	なし	(1)放圧板破損 (2)アンカーボルト破断 (3)ケーブルヘッド破損 (4)コンサベータ落下 (5)支持碍子破損
遮断器	①, ③	(1)投入コイル焼損	(1)碍管部折損	(1)ブッシング破損	(1)ブッシングずれ、破損 (2)本体傾斜
断路器	①	(1)端子変形 (2)碍子破損	(1)碍管部の折損、亀裂、損傷 (2)支持碍管部の折損、亀裂、損傷	(1)本体の傾斜 (2)碍管部の傾斜	(1)支持碍子折損 (2)導電部損傷 (3)駆動ロッド湾曲変形 (4)端子板変形
避雷器	②	なし	(1)碍管部折損、亀裂、損傷 (2)支持碍管部折損、亀裂、損傷	なし	(1)碍管折損 (2)エポキシ絶縁体破損 (3)本体傾斜

6. 変電設備被害と耐震対策に関する考察

(1) 被害モードの分類

一般に変電・開閉設備は、構造的に類似したものが多く図-7に示すように、4つに分類できる⁹⁾。すなわち、①碍管の上部に比較的重い部分のある遮断器・断路器のようなトップヘビー構造物、②高さ方向の質量分布が極端に変化しない避雷器・変流器・計器用変圧器等の塔状構造物、③変圧器等の剛体と考えられる本体上に塔状のブッシングが取り付けられている構造物(タンクタイプ)、④タンクとそのタンク間をパイプで結合するガス絶縁開閉装置のような骨組構造物やアルミパイプ母線などの長径間構造物、などである。このため、変電・開閉設備は、地震時に類似した損傷モードを生ずることが多い。表-

13は、上記4つの地震でもっとも被害の多かった変圧器、断路器、遮断器、避雷器の各構造タイプと被害モードを示す。どの地震でも、設備の形状特性から応力の集中してしまう箇所に碍子、碍管およびブッシングなどの絶縁体が用いられている場合には、その部分が被害を受ける可能性が大きい。また、変圧器などタンクタイプで剛体に近い設備の場合には、基礎とのアンカーボルトの折損などによる変圧器本体の滑动などの事故が多く発生している。

(2) 耐震設計基準の日米比較

日本の変電設備の耐震設計は、0.5~10Hz程度の固有振動数を有する標準的な変電設備に対しては、0.3G共振正弦3波法が導入されている(変圧器などは、0.5G共振

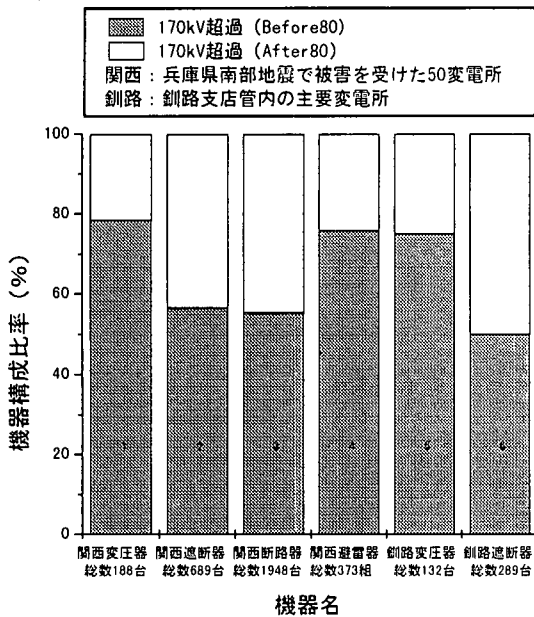


図-9 主要変電設備の設置年代別の構成比率

正弦3波法で設計されている設備もある)。共振正弦3波法で設計した場合、減衰定数5%の設備に対しては、変電設備下端からの入力に対して変電設備の応答倍率が約6.1倍 ($=1/2h \times (1 - e^{-2hn})$) ; h:減衰定数, n:正弦波の波数)となる。また、安全率(=許容応力/発生(計算)応力)は、この0.3G共振正弦3波に対して1.0以上の値がとられている。よって、安全率を1.0として0.3Gの入力地震動に応答倍率の6倍を掛けると、0.5~10Hzの固有振動数をもつ変電設備は、この振動数範囲内に卓越振動数を持つ地震動に対して少なくとも約1.8G ($=1.0 \times 0.3 \times 6.1$) 程度の最大水平加速度までは耐えられるように設計されていることになる。この日本の変電設備の耐震設計条件を、米国のDWPが採用している設計用加速度応答スペクトルと比較するために、横軸に固有振動数を取り、縦軸に減衰定数5%の加速度応答スペクトル(G)をとって、図-8に示す。ただし、図-3では、DWPで標準的に用いられている減衰定数2%の設計用加速度応答スペクトルを示したが、図-8は、日本の変電設備で一般的である減衰定数5%に揃えて比較している。図-8は、日米の旧耐震基準(現行の耐震基準が制定されるまで用いられていた基準)も併せて示している。この図に示すように、日本で標準的な動的設計を採用している0.5~10Hzの固有振動数をもつ変電設備の強度は、DWPよりもはるかに大きい。

日本の場合、変電設備の固有振動数が0.5Hzを下回る時、または10Hzを上回る時には、設計波形(共振正弦3波)をそれぞれ0.5Hz、10Hzとしているため、単純に

加速度応答スペクトルには換算できない。よって、図中では省略している。

さらに、注目すべき事実として、ノースリッジ地震で被害が生じたシルマー(Sylmar)交直変換所で記録された地震動は、2~5Hzの周波数領域で、新基準の加速度応答スペクトルを大きく越えている(図-3参照)。これに対し、DWPでは、同地震後の耐震基準の改訂が、将来起こるであろう地震に対してどこまで有効かについては一切保証できないとしている。ただし、同地震後の改訂によって地震時の供給信頼性が改善できることはDWP内の関係部署で合意を得ているとしている⁹⁾。

一方、日本の場合、兵庫県南部地震で記録された地震波の応答スペクトルからの解析によれば、変電設備の高共振周波数帯(5~10Hz)では、現行設計地震力の応答値を上まわるが、実際に使用されている変電設備の耐震強度の平均値は現行基準を十分上まわっていることから損壊につながるものは僅少であり、系統としては十分な耐震性を有していると結論づけている¹²⁾。

(3) 現在の耐震対策の問題点

図-9は、釧路沖地震、北海道東方沖地震、兵庫県南部地震で被害のあった地域の170kV超過の変電設備の構成比率を設置年代ごとに示している。Before80とは、JEA5003が制定される以前に、設置された設備を示し、After80とは、1980年以降に設置された設備を示す。この図で明らかなように1980年以前に設置された設備がいまだに数多く、既存の設備に残されている。このことは、旧基準のもとで設計された設備の改修作業の困難さを示している。

兵庫県南部地震を受けて、全国の主要な系統を構成する170kV超過の変電設備については、順次、今後3年以内を目処に現行基準レベルへの改修を行うことが必要であると指摘された。しかし、それらの被害の多くは170kV以下の設備にも生じている。下位レベルの設備についての耐震対策も当然検討されるべきであるが、膨大な数にのぼるこれらの変電設備に対して、今後数年以内に一律に何らかの耐震対策を行うことは、不可能に近い。このような現状では、現行基準に準拠していない旧設備だけでも、米国で行われているように地震ハザードを考慮して地域(電力会社)ごとに耐震設計基準(たとえば、設計用応答スペクトル)を設定するなどの方法も現実的な対応として考えられる。米国では、IEEEやASCEなど変電設備に対する共通の耐震設計基準を定めているものの、ほとんどの地域の変電設備は耐震設計がなされておらず、同基準を満たすような耐震設計を行っている地域はほとんどない。すなわち、今後は、地震ハザードや地域特性を考慮して、限られた費用の中で補強や更新を行うべき設備を合理的に選別するための戦略を検討することが必

要となる。

さらに、さきにも述べたように電力系統の設備形成基準は、常時の供給信頼性を高く保つことを前提として設定されており、地震などの多重事故時には運用でカバーすることを基本としている。このため、4地震での教訓は、各被災事業者の運用上の個別対応レベルには活かされているものの、設備の基準設定などにどう反映させるかという視点からの検討には、ほとんど活かされていない。この結果、電力ネットワークとしての耐震性能があまりにままにされ、図-5、図-6で示したように電力系統の特性や被害規模に応じて、復旧時間や供給支障量が大きく変化してしまうことを避けることができない。今後は、電力ネットワークとしての耐震性をどう個別の設備の耐震設計基準や設備形成基準に反映させるかなどの検討を行う必要がある。

7. まとめ

本論では、変電設備に被害があった最近の4つの地震を例として①変電設備の被害とその耐震対策、②電力系統の機能被害とその耐震対策という観点から整理した。その後、変電設備の被害とそれらの耐震対策について地震間、地域間比較を行いながらその妥当性について考察し、以下のような結論を得た：

- (1) 日本では、1980年以前に設置された現行の耐震基準に準拠していない碍子系の設備に被害が集中した。米国においても碍子系設備に被害が集中している。
- (2) 変電設備は、類似した形態をしている設備が多く、その地震被害モードは限定される。その結果、既存の耐震補強工法も限られており、その補強効果も多くの実験や解析により確認されている。
- (3) 日本の変電設備における現行の設計用の地震動は、米国のDWP（ロスアンジェルス市水道電力局）で規定している地震力と比べ、水平動に対しては大きく、上下動に対して小さい。
- (4) 米国のDWPでは、ノースリッジ地震後に変電設備の耐震設計基準が改訂された。しかしながらDWPは、新たに規定された設計用加速度応答スペクトルの値が同地震で記録された加速度応答スペクトルよりも小さいことを明示した上で、今後発生する地震に対して、今回の耐震基準の改訂がどこまで有効かについては、一切保証できないとしている。一方、日本の場合には、兵庫県南部地震後に変電設備の耐震性が議論され、現行の耐震設計基準が妥当であると判断された。これは、兵庫県南部地震のようにレベル2地震動に相当するような大地震に対しては、電力系統の場合、系統に冗長性があるため運用で対処できるものとしているためである。
- (5) 日本の電力系統には、現行の耐震基準の設定される

以前に設置された変電設備が未だに数多く残されており、短期的にそれらの設備をすべて改修、補強することは難しい状況にある。

- (6) 電力系統の設備形成基準は、雷などによる単一事故や常時の供給信頼性を考慮して設定されている。よって、地震時のような低頻度大規模事故が発生した場合には、運用でカバーすることになっている。その結果、電力ネットワークとしての耐震性能が明確にされないままになっている。
- (7) 地震時の供給支障事故は、ジャンパー線の振動で発生する地絡・短絡や電氣的な異常を検知する継電器の誤動作により発生することが多い。また、電氣的な異常で発生した供給支障は短時間に解消する。
- (8) 現実的に変電設備の耐震対策を行うためには、限られた費用の中で補強や更新を行うべき変電設備を、合理的に選別するための戦略を検討することが必要である。
- (9) 電力ネットワークとしての耐震性を個々の設備の耐震基準等に反映させるための検討が必要である。

謝辞：本論は、(財)電力中央研究所とNCEERとの共同研究の中で、米国ロスアンジェルスで現地調査を行った成果を含んでいる。本論をとりまとめるにあたり、北海道電力、関西電力、米国ロスアンジェルス水道電力局、南カルフォルニア大学篠塚正宣教授には多大な協力を得た。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高田 至郎、田中 修司、岩橋 敏広、朱牟田 善治、小林 隆、中野 雅弘、亀田 弘行、能島 暢呂：9. ライフライン、震害調査シリーズ②1993年釧路沖地震震害調査報告、土木学会、1994年12月。
- 2) 朱牟田善治、岩橋敏広、当麻純一、坂本容：釧路沖地震における電力施設の被害と復旧－施設被害と供給支障の関係－、地域安全学会論文報告集、pp. 203～pp. 210、1993年5月。
- 3) 井上大栄代表：電力中央研究所報告 調査報告、U92047、1993年釧路沖地震被害調査報告、1993年2月。
- 4) 山崎 文雄、能島 暢呂、朱牟田 善治、吉川 洋一：ライフライン系の被害、1994年ロスアンジェルス地震と都市機能障害の調査研究、文部省突発災害研究、1994。
- 5) 朱牟田善治、大友敬三、山崎文雄、石田勝彦：1994年ノースリッジ地震による電力設備の被害と復旧、土木学会論文集 No. 507/1-30、pp. 305-pp. 314、1995。
- 6) Schiff, A.J.: Northridge Earthquake-lifeline performance and post-earthquake response, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Monograph, No.8, 1995。
- 7) Power operating and maintenance division operating engineering section: January 17, 1994 Northridge Earthquake

- Major Emergency Report, City of Los Angeles Department of Water and Power, 1994.
- 8) The Power system seismic program management committee of the city of Los Angeles Department of Water and Power: Intermediate term plan for seismically hardening the Los Angeles transmission-level power facilities, City of Los Angeles Department of Water and Power, 1995.
 - 9) 釧路支店, 帯広支店: 1994年10月北海道東方沖地震災害報告書「配電設備」, 北海道電力株式会社, 1995.
 - 10) 朱牟田善治, 石田勝彦, 八幡清一: 釧路地域の電力設備における耐震対策の効果, 第23回地震工学研究発表会, 土木学会耐震工学委員会, 1995年7月.
 - 11) 澤田義博代表, 1995年兵庫県南部地震被害調査速報, 電力中央研究所報告 調査報告, U94042, 1995年2月.
 - 12) 電気設備防災対策検討報告会: 地震に強い電気設備のために, 資源エネルギー庁編, 電力新報社, 1996.
 - 13) 関西電力株式会社: 阪神・淡路大震災復旧記録, 1995.
 - 14) 電気事業連合会: 電気設備対策特別委員会報告書(詳細編), 1979.
 - 15) 変電機器耐震設計専門委員会: 変電機器の耐震設計, 電気協会協同研究, 第34巻 第3号, 社団法人電気協同研究会, 1978.
 - 16) 電力系統の事故時復旧調査委員会: 電力系統の事故時復旧操作, 電気学会技術報告(II部), 第354号, 電気学会, 1990.
 - 17) 電気技術基準調査委員会: 変電所等における電気設備の耐震対策指針, JEAG5003, 社団法人日本電気協会, 1980.
 - 18) 変電機器耐震設計専門委員会: 変圧器ブッシングの耐震設計, 電気協同研究会, 第38巻 第2号, 社団法人電気協同研究会, 1982.
 - 19) 変電機器耐震設計専門委員会: 変電機器リード先の耐震対策, 電気協同研究会, 第38巻 第3号, 社団法人電気協同研究会, 1982.
 - 20) 変電機器耐震設計専門委員会: 大口径アルミパイプ母線, 電気協同研究会, 第38巻 第4号, 社団法人電気協同研究会, 1983.
 - 21) International conference of building officials: Uniform Building Code Structural Engineering Design Provision, 1994.
 - 22) 阪神, 淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神, 淡路大震災調査報告—ライフライン施設の被害と復旧—, 土木学会, 1997.

(1997. 6. 26受付)

CHARACTERISTICS OF SUBSTATION FACILITIES' DAMAGE CAUSED BY RECENT EARTHQUAKES AND THEIR SEISMIC COUNTERMEASURES

Yoshiharu SHUMUTA

This paper presents characteristics of substation facilities' damage caused by recent earthquakes and their seismic countermeasures in order to realize future subjects. Damage to substation components and functional loss of electric power systems caused by 1993 Kushiro-Oki, 1994 Northridge, 1994 Hokkaido Toho-Oki, and 1995 Hyogoken Nanbu earthquakes are carefully examined. Existing seismic countermeasures related to substation components and power system operations are also examined. After that, future subjects of seismic countermeasures are discussed on the basis of these examinations.