電力系統における負荷の電圧特性の算出と推定

正員 山下 益 功 (北陸電力)

正員 金 尾 則 一 (北陸電力)

正員 柳 田 孫 肖 (北陸電力)

Calculation and Estimation of Load Voltage Characteristics in Power System

Mitsunori Yamashita, Member, Norikazu Kanao, Member, Hikoni Yanagida, Member, (Hokuriku Electric Power Company)

This paper presents a method for calculating and estimating the parameters of a bus load model in power system stability studies. There are two basic approaches to obtain load voltage characteristics. One is to directly measure the voltage sensitivity of load active power and reactive power at substations or feeders. The other is to build up a composite load model from knowledge of the mix of load class. It is effective to calculate load voltage characteristics by utilizing the feature of both approaches.

The bus load model we propose consists of a load branch with equivalent impedance to the feeders and transformers in the 66kV or 77kV distribution system, reactive power compensation and load, which is composed of three load classes, such as industrial, commercial and residential. The load voltage characteristics are calculated from voltage and current measured at several feeders, where voltage sag due to a fault occurs. The static load voltage characteristics are represented the exponents, and have correlation with temperature. Exponents of load class are calculated from the measured exponents, temperature and load class mix by least-squares method. The validity to be applicable for the estimated exponents by the exponents of load class and the mix of load classes is evaluated. The bus load using this exponents will be adaptable to not-measured bus loads. They will make stability simulation results more accurate.

キーワード：負荷電圧特性，負荷ブランチ，無効電力補償，気温，電力種別構成，最小二乗法

Keywords : load voltage characteristics, load branch, reactive power compensation, temperature, load class mix, least-squares method

1. まえがき

電力設備の計画・運用において効率的，安定な電力供給のためには，発電機，送電線，負荷などを精度良く模擬した電力系統解析が重要である。特に，負荷特性は発電機や送電線などと違い，需要家における無数の負荷機器 (load device; 照明器具，冷蔵庫，空調機器など) の構成比および使用状態が変化するため，そのモデリングや定数算出には困難な面がある⁽¹⁾。

負荷のモデリングには，大きく分けて2つの検討のアプローチがある^{(2)~(4)}。一つは，負荷機器の単体特性を理論的解析や実験室での実測により把握し⁽⁵⁾，これらがある構成比で組み合わされたものとする構成ベース方式 (component-based method)，もう一つは，変電所や送電線における有効電力および無効電力を電圧の感度として負荷特性を直接実測し求める⁽⁶⁾ 実測ベース方式 (measurement-based

method) である。構成ベース方式は，変電所や送電線での実測が不要である利点があるが，個々の変電所や送電線における負荷機器の構成比を決定することが困難である欠点がある。一方，実測ベース方式は，実測した特定の変電所や送電線の負荷特性を電力系統解析に直接適用できる利点があるが，他地点の負荷特性として適用できるとは言い難い。このため，実測ベース方式で得られた負荷特性の実測値から，他地点の負荷特性を推定できるような負荷特性の一般式を求めることが望ましい。このような考えから，計測データの各次高調波の値をもとに負荷機器の構成比を求め，負荷特性を同定する方法⁽⁷⁾などの検討が行われているが，実系統への適用には検討の余地が多いと思われる。

そこで，実測，構成ベースの両方式の特徴を活かす観点から，負荷電圧特性の一つの要素である電圧静特性定数 (以下，電圧静特性) の推定方法について，図1に示す手順により検討を行ったので報告する。

図 1 電圧静特性の分析概要
Fig. 1. Overview of analysis of load voltage characteristics.

まず、第 2 章では、基幹系の電力系統解析で使用する連系用変電所二次側（本論文では、66, 77kV）の負荷として、負荷系統内の電力損失を考慮した系統負荷モデルを提案する。第 3 章では、この負荷の電圧静特性の算出方法を示し、第 4 章では、実測データを用いた電圧静特性の算出結果と気温との相関などについて述べる。次に第 5 章では、この負荷が電力種別（load class: 工業、商業、住宅）で構成されるものと考え、最小二乗法を用いて気温特性を持つ電力種別単位の電圧静特性を求め、負荷の電圧静特性をその構成比から一般的に表現する方法を提案し（以下、電圧静特性の一般式）、その有効性を評価する。最後に第 6 章で、提案する系統負荷モデルと電圧静特性の推定値の電力系統解析への適用方法を示す。

2. 系統状態を考慮した系統負荷モデル

基幹系の電力系統解析では、図 2(a)に示す連系用変電所二次側の負荷系統をどのように簡略化して表現するかが課題となる。従来から提案されている系統負荷モデル⁽⁸⁾では、図 2(b)に示すようにコンデンサと負荷から構成され、負荷系統内の電力損失は負荷の一部に含めているものが多い。このため、計測点である送電端で算出される負荷特性は、系統構成の影響を受けることになる⁽⁹⁾。リアクタンス

X [p.u.]（ここでは抵抗 R [p.u.]、アドミタンス Y [p.u.]は零と仮定）、負荷の大きさ $W_l (=P+jQ_l)$ [p.u.]および負荷の電圧静特性 K_{pr}, K_{qr} ((1), (2)式参照)を用いて、送電端の電圧静特性 K_{ps}, K_{qs} を求め、系統構成の違いによる電圧静特性への影響を、送受電端の電圧静特性の比 $K_{ps}/K_{pr}, K_{qs}/K_{qr}$ で図 3 に示した。

$$P_i = P_h \cdot \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^{K_{pr}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_i = Q_h \cdot \left(\frac{V_i}{V_n} \right)^{K_{qr}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

添え字 i は初期値を示す。

V_r : 受電端電圧 [p.u.]

P_h, Q_h : 負荷の有効、無効電力 [p.u.]

K_{pr}, K_{qr} : 有効、無効電力の電圧静特性

これより X, W_l が大きいほど影響が大きく、比率の大小は K_{pr}, K_{qr} の組合せによって決まることがわかる。また、この比率が K_{ps} より K_{qs} の方が大きいのは、リアクタンスにおける無効電力損失のためである（付録 1）。なお、 K_{pr}, K_{qr} がともに定インピーダンス特性 ($K_{pr}=K_{qr}=2$) であれば、 X, W_l によらず $K_{ps}=K_{qs}=2$ であり、 K_{pr} が定電力特性 ($K_{pr}=0$)

図2 系統負荷モデル
Fig. 2. Bus load model.

であれば、 X 、 W_l によらず $K_{ps}=0$ (K_{qr} 、 K_{qs} も同様) となる。

このように、送電端の電圧静特性は、負荷系統で異なるインピーダンスや潮流状態の影響を受けることから、電圧静特性を一般的に求めるには、負荷系統を図2(c)に示すような系統負荷モデルで表現し、受電端に接続される負荷の電圧静特性を求めることが必要になる。

3. 負荷の電圧静特性の算出方法

〈3・1〉 概要 提案する系統負荷モデル (図2(c)) における負荷の電圧静特性を求めるため、図1のように、次の3つのステップにより行う。

第1ステップ：系統負荷モデルを構成する負荷ブランチ、無効電力補償量の値を求める。負荷ブランチのインピーダンスは設備データから、無効電力補償量は定常時の送電端有効電力と無効電力データをプロットした P-Q 特性から求める。

第2ステップ：負荷の電圧静特性を求めるには、負荷の $P_l + jQ_l$ と電圧 V_r の電圧変化時の時系列データが必要である。本論文では、系統故障による瞬時電圧低下時の故障波形データ

ータを利用することとした。計測される故障波形データは送電端潮流 $P_s + jQ_s$ と電圧 V_s であるため、これを第1ステップで求めた系統負荷モデルに与え、負荷の $P_l + jQ_l$ と電圧 V_r の故障波形データを求める。

第3ステップ：負荷の $P_l + jQ_l$ と電圧 V_r の故障波形データから、負荷の脱落特性を分離して、電圧静特性 K_{pr} 、 K_{qr} を求める。

〈3・2〉 系統負荷モデルの構築

〈3・2・1〉 負荷ブランチのインピーダンスの算出 負荷ブランチのリアクタンス X [p.u.]は、第2章の検討から負荷系統の無効電力損失を保存するように求める。なお、66、77kV 負荷系統の検討であることから、負荷ブランチの抵抗 R [p.u.]、アドミタンス Y [p.u.]は十分小さく零として扱う。

無効電力損失を保存する X を求めるには、負荷系統の詳細潮流計算を行えばよいが、計算が煩雑なことから現実的でない。このため、負荷系統内の設備データのみから算出

$$X = \frac{\sum_i^{m_{TR}} W_{TRi}^2 \cdot X_{TRi}}{\left(\sum_i^{m_{TR}} W_{TRi} \right)^2} \quad (3)$$

$$X_0 = \frac{V_s^2 \cdot \sum_i^{m_{BR}} Q_{lossi}}{P_c^2 + Q_c^2} \dots\dots\dots (4)$$

故障直前の無効電力補償量 Q_c' は、 $\tan \theta$ と故障波形データから読み取れる故障直前の送電端潮流 $P_{si} + jQ_{si}$ [p.u.] と電圧 V_{si} [p.u.] を用いて、(5)' 式より Q_c を補正して求める。

$$Q_c' = \left(\frac{V_c}{V_n} \right)^2 \cdot \left\{ Q_{si} - \frac{X \cdot (P_{si}^2 + Q_{si}^2)}{V_{si}^2} - (\tan \theta) \cdot P_{si} \right\} \quad (5)'$$

$$\text{ここで、} V_n = \sqrt{\left(V_{si} - \frac{X \cdot Q_{si}}{V_{si}} \right)^2 + \left(\frac{X \cdot P_{si}}{V_{si}} \right)^2}, \quad P_{li} = P_{si}$$

〈3・3〉 負荷の故障波形データの算出 瞬時電圧低下時の故障波形データから求まる送電端潮流 $P_s + jQ_s$ [p.u.] と電圧 V_s [p.u.] を用いて、(6)、(7)、(8) 式により時系列に算出することで、負荷の $P_l + jQ_l$ [p.u.]、電圧 V_r [p.u.] の故障波形データを求めることができる。図 6 に一例を示す。

$$V_r = \sqrt{\left(V_s - \frac{X \cdot Q_s}{V_s} \right)^2 + \left(\frac{X \cdot P_s}{V_s} \right)^2} \quad (6)$$

$$P_l = P_s \quad (7)$$

$$Q_l = Q_s - \frac{X \cdot (P_s^2 + Q_s^2)}{V_s^2} - Q_c' \cdot \left(\frac{V_r}{V_c} \right)^2 \quad (8)$$

V_r : 受電端の電圧 (故障時) [p.u.]

P_l, Q_l : 負荷の有効、無効電力 (故障時) [p.u.]

図 6 送電端と負荷の故障波形データ (例: A1 線)

Fig. 6. Variation of voltage, active power and reactive power.

〈3・4〉 電圧静特性の算出 故障時の電圧低下の大きさにより負荷脱落が起こるため、故障除去後に負荷が落ち着いた値 P_{li}, Q_{li} [p.u.] には、負荷脱落と電圧静特性の影響が重畳される。この様相を図 7 に示す。

このため、まず収集した故障波形データを送電線、季節 (夏期、夏期以外) 毎に分類して平均的脱落特性を算出する。次に各故障波形データについて負荷脱落量を求め、分離した後、電圧静特性 Kpr, Kqr を算出する⁽¹⁰⁾。なお、平均的脱落特性は折線モデル (付録 2) を、電圧特性は伝達関数で表現した動特性モデル(9)、(10)式を採用した。

$$P_l = P_{li} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + T_p \cdot s} \cdot \left(\frac{V_r}{V_n} \right)^{Kpr} + \frac{T_q \cdot s}{1 + T_q \cdot s} \cdot \left(\frac{V_r}{V_n} \right)^{Kqr} \right\} \quad (9)$$

図 7 負荷脱落と電圧静特性の影響の分離

Fig. 7. Separation between the discontinuous load and the static load.

$$Q_l = Q_{li} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + T_q \cdot s} \cdot \left(\frac{V_r}{V_n} \right)^{Kqr} + \frac{T_p \cdot s}{1 + T_p \cdot s} \cdot \left(\frac{V_r}{V_n} \right)^{Kpr} \right\} \quad (10)$$

Kpr, Kqr : 有効、無効電力の電圧静特性

Kpr', T_p : 有効電力の電圧動特性定数、時定数

Kqr', T_q : 無効電力の電圧動特性定数、時定数

4. 電圧静特性の算出結果と考察

〈4・1〉 電圧静特性の算出結果 第 3 章の算出方法により、次の実測データから電圧静特性を算出した。表 2 に送電端における電圧静特性 Kps, Kqs ($X=0$ で算出) の平均値と分散、負荷の電圧静特性 Kpr, Kqr の平均値と分散の算出結果、および平均的脱落特性、 $X, \tan \theta$ を示す。なお、故障波形データについては、30 分以内の連続故障などは不採用とした。

・ 定常時データ ;

毎正時に計測したデータ

1 送電線あたり 936 件 (8 週分)

・ 故障波形データ ;

故障発生時に計測したデータ

サンプリング周波数 3840Hz

計測時間 1~2 秒

(故障継続時間などにより、データ長が異なる)

5 変電所 (A~E)、合計 11 送電線引き出し点

採用データ数 全 539 件 (1996/10~2001/9)

〈4・2〉 考察

〈4・2・1〉 送電端の電圧静特性との関係 表 2 より送電端における Kps, Kqs は、これまでの報告例⁽¹⁾と大差ない。負荷の Kpr は Kps とほぼ同じであるが、負荷の Kqr は Kqs に比べ全体的に大きな値となった。

〈4・2・2〉 季節および気温との関係 表 2 より夏期の Kpr, Kqr は、夏期以外の Kpr, Kqr に比べ小さな値となっ

表2 電圧静特性の算出結果と各諸量

Table 2. Exponents of voltage, load ramp down parameters, equivalent reactance, load power factor and rate of load class mix.

送電線	採用デ ータ数	送電端の電圧静特性		負荷の電圧静特性		脱落開始 電圧低下率	脱落飽和 電圧低下率	脱落増加率		X	$\tan \theta$	電力種別構成比		
		Kps (有効)	Kqs (無効)	Kpr (有効)	Kqr (無効)	$\Delta V_0[\%]$	$\Delta V_m[\%]$	Ap (有効)	Aq (無効)	[p.u.]	(Q/P)	P_1 (工業)	P_2 (商業)	P_3 (住宅)
A1	16	0.76 (0.038)	1.93 (0.472)	0.76 (0.046)	2.32 (0.457)	14.9	51.2	0.49	0.81	0.14	0.41	0.247	0.083	0.670
	27	1.16 (0.016)	2.74 (0.175)	1.18 (0.018)	3.23 (0.257)	15.6	59.9	0.49	0.80					
A2	10	0.74 (0.020)	2.69 (0.664)	0.76 (0.021)	3.28 (0.852)	11.5	48.7	0.53	0.91	0.13	0.41	0.420	0.140	0.440
	19	1.02 (0.017)	3.45 (0.609)	1.04 (0.023)	4.19 (1.369)	10.6	64.7	0.53	0.91					
A3	15	0.85 (0.040)	2.77 (0.401)	0.85 (0.038)	3.59 (0.424)	9.3	73.5	0.45	0.71	0.10	0.25	0.189	0.234	0.577
	19	1.17 (0.017)	4.00 (0.935)	1.21 (0.017)	4.63 (1.178)	7.4	57.8	0.44	0.76					
B1	17	0.76 (0.026)	2.25 (0.352)	0.77 (0.028)	2.55 (0.489)	13.0	54.3	0.82	1.45	0.08	0.43	0.397	0.100	0.503
	27	1.10 (0.024)	3.00 (0.334)	1.10 (0.030)	3.46 (0.481)	13.0	55.4	0.72	1.07					
B2	18	0.85 (0.018)	2.40 (0.126)	0.86 (0.019)	2.82 (0.199)	14.6	41.9	0.62	1.21	0.11	0.42	0.277	0.119	0.604
	31	1.15 (0.017)	2.79 (0.249)	1.16 (0.023)	3.25 (0.488)	16.1	53.3	0.63	1.21					
B3	17	0.74 (0.055)	2.20 (0.414)	0.74 (0.059)	2.52 (0.614)	12.1	56.3	0.86	1.46	0.19	0.41	0.455	0.060	0.485
	25	1.04 (0.035)	2.95 (0.613)	1.05 (0.039)	3.47 (0.958)	14.6	41.8	0.50	1.43					
C1	25	0.86 (0.049)	2.34 (0.419)	0.88 (0.052)	3.07 (0.973)	8.4	39.6	0.23	0.59	0.16	0.46	0.233	0.154	0.613
	26	1.16 (0.029)	2.81 (0.152)	1.20 (0.032)	3.36 (0.298)	9.7	71.9	0.25	0.41					
C2	20	0.92 (0.030)	2.36 (0.339)	0.92 (0.033)	2.63 (0.407)	10.9	43.5	0.65	1.75	0.06	0.52	0.608	0.057	0.335
	24	1.08 (0.032)	3.00 (0.529)	1.04 (0.048)	3.16 (0.870)	10.0	76.8	0.79	1.47					
D1	24	0.87 (0.065)	2.17 (0.372)	0.86 (0.068)	2.60 (0.425)	7.7	53.2	0.23	0.31	0.75	0.31	0.138	0.075	0.787
	49	1.15 (0.055)	2.65 (0.372)	1.17 (0.059)	3.02 (0.646)	10.1	89.0	0.24	0.51					
D2	28	0.84 (0.075)	2.15 (0.439)	0.84 (0.080)	2.54 (0.567)	8.6	60.4	0.21	0.20	0.39	0.38	0.080	0.127	0.793
	63	1.24 (0.028)	2.59 (0.220)	1.24 (0.036)	2.95 (0.393)	12.7	77.6	0.20	0.35					
E1	15	0.70 (0.020)	1.99 (0.448)	0.70 (0.021)	2.31 (0.510)	15.3	56.6	0.65	1.10	0.11	0.49	0.288	0.118	0.594
	24	1.05 (0.023)	3.09 (0.322)	1.06 (0.025)	3.60 (0.657)	14.6	46.2	0.54	0.81					

上段：夏期（6～9月），下段：夏期以外，電圧静特性の値は平均値，カッコ内の値は分散を示す。 X は100MVA ベースの値を示す。

た。この傾向をさらに詳しく分析するため、 Kpr 、 Kqr と気温 $t[^\circ\text{C}]$ をプロットした一例を図8に示す。

これより、夏期の Kpr 、 Kqr は気温が高くなるほど、夏期以外のそれらは気温が低くなるほど小さくなり、 Kqr は Kpr に比べて気温感度が高い（気温に対する傾きが大きい）ことがわかる。 Kqr はバラツキが大きいものの、 Kpr とともにある程度気温に対する相関があることがわかる。この特性を表現するため、電圧静特性と気温との一次回帰直線（以下、気温回帰式）を求め、 Kpr 、 Kqr と気温回帰式との残差の分散を表3に示す。また、気温回帰式を図8に併記する。

表3より、気温回帰式の残差の分散は、表2における Kpr 、 Kqr の平均値の分散に比べ全体的に小さいことがわかる。これより、電圧静特性の値としては、気温回帰式による推定値の方が概ね精度のよいことがわかる。

〈4・2・3〉 送電線による違い 表3と図8より、各送電線で気温特性が異なることがわかる。これは各送電線に接続される負荷機器の構成の違いによるものと思われる。

5. 電圧静特性の一般式の算出

〈5・1〉 考え方 各送電線の負荷機器の構成を把握することは困難であるため、需要家などの契約電力種別（高圧、業務用、電灯など）から得られる電力種別（工業、商業、住宅）をもとに、電圧静特性を一般的に表現することとする。第4章に示したとおり、負荷の電圧静特性は気温と相関があることから、気温特性を持つ電力種別単位の電

表3 気温回帰式の残差の分散

Table 3. Dispersion of Residual between the measured exponents and regression equation of temperature.

送電線	有効電力の特性		無効電力の特性	
	気温回帰式	分散	気温回帰式	分散
A1	$-0.05t+2.21$	0.009	$-0.13t+5.73$	0.264
	1.18	0.018	$0.04t+2.98$	0.225
A2	$-0.03t+1.65$	0.009	$-0.18t+8.10$	0.531
	1.02	0.025	$0.10t+3.49$	1.075
A3	$-0.05t+2.08$	0.010	$-0.05t+4.96$	0.418
	$0.01t+1.14$	0.013	$0.14t+3.72$	0.550
B1	$-0.03t+1.55$	0.020	$-0.16t+6.85$	0.240
	$0.01t+1.07$	0.029	$0.07t+3.16$	0.368
B2	$-0.04t+1.93$	0.011	$-0.11t+5.40$	0.156
	$0.01t+1.09$	0.018	$0.09t+2.85$	0.290
B3	$-0.04t+1.76$	0.048	$-0.12t+5.65$	0.512
	1.05	0.041	$0.05t+3.24$	0.920
C1	$-0.04t+1.95$	0.014	$-0.08t+5.09$	0.216
	$0.01t+1.17$	0.033	$0.03t+3.24$	0.290
C2	$-0.03t+1.56$	0.021	$-0.11t+5.15$	0.215
	1.06	0.050	3.18	0.909
D1	$-0.03t+1.74$	0.067	$-0.04t+3.70$	0.488
	$-0.01t+1.21$	0.046	3.02	0.460
D2	$-0.05t+2.03$	0.055	$-0.01t+2.85$	0.587
	$-0.01t+1.31$	0.034	$-0.02t+3.08$	0.302
E1	$-0.03t+1.62$	0.014	$-0.05t+3.74$	0.528
	1.09	0.026	$0.06t+3.19$	0.539

上段：夏期（6～9月），下段：夏期以外 t : 気温 $[^\circ\text{C}]$

気温回帰式は、 Kpr , Kqr と気温 t との一次回帰直線（季節毎に算出）。一般式、推定式は後述する。

図 8 電圧静特性の気温相関

Fig. 8. Correlation between the exponents of voltage and temperature.

圧静特性 Kp_i を算出し、これらと電力種別構成比 P_i を用いて電圧静特性を一般的に表現する方法を提案する。これにより、非計測点の負荷の電圧静特性についても推定が可能となる。

〈5・2〉 電圧静特性の一般式の算出方法 Kpr , Kqr は、(11), (13)式に示す気温 t [°C] と一次相関をもつ電力種別単位の Kp_i , Kq_i が電力種別構成比 P_i の加重平均値で表現できると仮定し、(12), (14)式の最小二乗法を用いて係数 a_{pi} , b_{pi} , a_{qi} , b_{qi} を求める。なお、季節間（夏期、夏期以外）で気温特性が異なることから、季節毎に係数を求め、その交点で気温特性が切替わる折線表現とした。

$$Kpe = \sum_{i=1}^3 Kp_i \cdot P_i \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $Kp_i = a_{pi} \cdot t + b_{pi}$, $\sum_{i=1}^3 P_i = 1$

$$Fp = \sum_{j=1}^N Wp_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 (a_{pi} \cdot t_j + b_{pi}) \cdot P_{ij} - Kpr_j \right\}^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Kqe = \frac{\sum_{i=1}^3 Kq_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^3 Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^3 Kq_i \cdot P_i \cdot \tan \theta_i}{\tan \theta e} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $Kq_i = a_{qi} \cdot t + b_{qi}$, $\tan \theta e = \sum_{i=1}^3 (P_i \cdot \tan \theta_i)$

$$Fq = \sum_{j=1}^N Wq_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 (a_{qi} \cdot t_j + b_{qi}) \cdot P_{ij} \cdot \tan \theta_i - Kqr_j \cdot \tan \theta e \right\}^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$Fq = \sum_{j=1}^N Wq_j \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 (a_{qi} \cdot t_j + b_{qi}) \cdot P_{ij} - Kqr_j \right\}^2 \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (14)'$$

Kpe , Kqe : 電圧静特性の一般式

$\tan \theta e$: $\tan \theta_i$ の P_i による加重平均値

N : 使用する全ての送電線におけるデータ総数

この際、送電線によるデータ数や Kpr , Kqr のバラツキの違いを考慮できるよう、重み係数 Wp_j , Wq_j を用いた。今回、 Wp_j , Wq_j は、気温相関の強い Kpr , Kqr を重視するように、気温回帰式の残差の分散の逆数（付録 3）としている。また、

電力種別単位の $\tan \theta_i$ は不明であることから、これをすべて同値 ($\tan \theta_i = \tan \theta_e$) とした(14)' 式で電力種別単位の Kq_i を算出することとした。

〈5・3〉 電力種別単位の電圧静特性の特徴 表4に539個の Kpr , Kqr を用いて算出した Kp_i , Kq_i を示す。

表4 電力種別単位の電圧静特性

Table 4. Load class exponents that are represented as linear equation of temperature.

電力 種別	有効電力の特性		無効電力の特性	
	夏期以外	夏期	夏期以外	夏期
工業	$0.016t + 0.729$	$-0.020t + 1.305$	$0.141t + 3.131$	$-0.158t + 6.301$
商業	$0.083t + 0.866$	$-0.028t + 1.921$	$0.620t + 5.427$	$-0.078t + 11.07$
住宅	$-0.023t + 1.388$	$-0.057t + 2.195$	$-0.105t + 2.662$	$-0.061t + 3.190$

t : 気温 [°C]

これより、次のことがわかる。

- ・工業 (Kp_1 , Kq_1)、商業 (Kp_2 , Kq_2) とともに、夏期は気温が高くなるほど、また夏期以外は気温が低くなるほど小さくなり、定電力特性に近づく。
- ・商業は工業よりも気温感度が大きい。
- ・住宅 (Kp_3 , Kq_3) は、工業、商業と比較して年間通じて気温感度が小さく、夏期・夏期以外とも気温が高くなるほど小さくなり、定電力特性に近づく。

〈5・4〉 電圧静特性の一般式の算出結果 前節の Kp_i ,

表5 各送電線の電圧静特性の一般式

Table 5. Linear equations that represent the exponents relationship to temperature in 11 measured feeders.

送電線	有効電力の特性		無効電力の特性	
	一般式	推定式	一般式	推定式
A1	$-0.05t + 1.95$	$-0.04t + 1.82$	$-0.09t + 4.61$	$-0.07t + 4.20$
	1.18	$-0.01t + 1.18$	$0.02t + 3.01$	$0.01t + 3.01$
A2	$-0.04t + 1.78$	$-0.04t + 1.79$	$-0.10t + 5.60$	$-0.10t + 5.41$
	$0.01t + 1.04$	$0.01t + 1.04$	$0.10t + 3.25$	$0.10t + 3.23$
A3	$-0.04t + 1.96$	$-0.04t + 1.88$	$-0.08t + 5.62$	$-0.11t + 6.29$
	$0.01t + 1.14$	1.15	$0.11t + 3.40$	$0.08t + 3.33$
B1	$-0.04t + 1.81$	$-0.04t + 1.83$	$-0.10t + 5.21$	$-0.09t + 5.03$
	1.07	1.07	$0.07t + 3.12$	$0.06t + 3.11$
B2	$-0.04t + 1.92$	$-0.04t + 1.93$	$-0.09t + 4.99$	$-0.09t + 4.97$
	1.14	1.15	$0.05t + 3.12$	$0.04t + 3.17$
B3	$-0.04t + 1.77$	$-0.04t + 1.77$	$-0.11t + 5.08$	$-0.10t + 5.04$
	1.06	1.06	$0.05t + 3.04$	$0.05t + 3.00$
C1	$-0.04t + 1.95$	$-0.04t + 1.94$	$-0.09t + 5.13$	$-0.07t + 4.87$
	1.15	1.15	$0.06t + 3.20$	$0.07t + 3.20$
C2	$-0.03t + 1.64$	$-0.03t + 1.42$	$-0.12t + 5.53$	$-0.24t + 8.57$
	$0.01t + 0.96$	$0.01t + 0.90$	$0.09t + 3.10$	$0.14t + 3.08$
D1	$-0.05t + 2.05$	$-0.05t + 2.12$	$-0.08t + 4.21$	$-0.08t + 4.29$
	$-0.01t + 1.26$	$-0.01t + 1.27$	$-0.02t + 2.93$	$-0.02t + 2.91$
D2	$-0.05t + 2.09$	$-0.05t + 2.10$	$-0.07t + 4.44$	$-0.09t + 5.01$
	$-0.01t + 1.27$	1.22	$0.01t + 3.05$	$0.05t + 2.96$
E1	$-0.04t + 1.90$	$-0.04t + 1.91$	$-0.09t + 5.01$	$-0.09t + 5.01$
	1.14	1.14	$0.05t + 3.12$	$0.05t + 3.12$

上段：夏期（6～9月）、下段：夏期以外 t : 気温 [°C]

Kq_i と各送電線の電力種別構成比 P_i から、(11), (13)式により送電線毎の電圧静特性の一般式を求めることができる。表5に A1～E1 送電線の一般式を示す。また、これを図8に併記する。

〈5・4・1〉 電圧静特性の一般式の有効性評価 各送電線において、「気温回帰式による推定値と実測値との相関係数 ((15), (16)式)」と、「一般式による推定値と実測値との相関係数」を比較することにより、一般式の有効性を評価することとした。表6に求めた相関係数を示す。

$$R_p = \frac{\sum_{i=1}^n (Kpr_i - AVE(Kpr))(Kpe_i - AVE(Kpe))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \{Kpr_i - AVE(Kpr)\}^2 \cdot \sum_{i=1}^n \{Kpe_i - AVE(Kpe)\}^2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$R_q = \frac{\sum_{i=1}^n (Kqr_i - AVE(Kqr))(Kqe_i - AVE(Kqe))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \{Kqr_i - AVE(Kqr)\}^2 \cdot \sum_{i=1}^n \{Kqe_i - AVE(Kqe)\}^2}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Kpr , Kqr : 実測値 Kpe , Kqe : 推定値
 n : 当該送電線における採用データ数
 $AVE()$ は平均値を示す。

表6 実測値との相関係数

Table 6. Correlation Coefficient between the mesuered exponents and the estimated exponents.

送電線	R_p (有効電力特性の係数)			R_q (無効電力特性の係数)		
	気温回帰式	一般式	推定式	気温回帰式	一般式	推定式
A1	0.895	0.889	0.884	0.758	0.744	0.727
A2	0.747	0.737	0.735	0.632	0.622	0.609
A3	0.905	0.903	0.888	0.597	0.668	0.695
B1	0.750	0.745	0.742	0.746	0.716	0.711
B2	0.830	0.762	0.743	0.679	0.635	0.614
B3	0.651	0.650	0.650	0.559	0.561	0.561
C1	0.811	0.809	0.809	0.656	0.618	0.625
C2	0.422	0.450	0.462	0.436	0.459	0.401
D1	0.570	0.570	0.570	0.242	0.263	0.264
D2	0.754	0.746	0.717	0.338	0.270	0.160
E1	0.798	0.795	0.793	0.578	0.698	0.692

これより、一般式は気温回帰式と同程度の精度であることがわかり、(11), (13)式が負荷の電圧静特性の推定に有効であるといえる。なお、D1, D2 線の無効電力特性については、気温回帰式の相関係数からわかるように、もともと気温との相関が低い。

〈5・4・2〉 非計測点における推定値の有効性評価 一般式の非計測点での有効性を確認するため、当該送電線の実測値が不明と仮定して、その他の送電線の実測値から算出した Kp_i , Kq_i による一般式（以下、推定式）を求めた。表5に A1～E1 送電線の推定式を併記する。推定式による

図9 提案する系統負荷モデルの電力系統解析への適用

Fig. 9. Application of the bus load model we propose to power system simulation.

推定値と実測値との相関係数を求め、前節と同様に気温回帰式での相関係数と比較した。表6に求めた相関係数を併記する。

これより、D2線の無効電力特性を除き、気温回帰式と同程度の精度で電圧静特性が求まることがわかり、一般的な電圧静特性が非計測点での電圧静特性の推定に有効であるといえる。

6. 電力系統解析への適用方法

図9に提案した系統負荷モデルと電圧静特性の推定値の電力系統解析への適用方法について示す。

事前処理: 次の3つの処理を行っておく。

- ・設備データから負荷ブランチのインピーダンスを求める。
- ・定常時データからP-Q特性を把握する。
- ・電力種別構成比から電圧静特性の一般式を求める。

電力系統解析時: 電力系統解析の負荷ノードにおける有効、無効電力指定値 $P_s + jQ_s$ [p.u.]から負荷の $P_l + jQ_l$ [p.u.]、 Q_c [p.u.]を、気温 t [°C]から電圧静特性 K_{pe} 、 K_{qe} を求め、入力データに設定する。

7. まとめ

本論文を要約すると次のとおりである。

(1) 電力系統解析用の負荷の表現方法として、負荷ブランチ、無効電力補償量および負荷からなる系統負荷モデルを提案し、実測データから負荷の電圧静特性 K_{pr} 、 K_{qr} を算

出した。

(2) 非計測点の負荷の電圧静特性を求めるため、電力種別構成比と気温で表現される電圧静特性の一般式の算出方法を提案し、その有効性を示した。

(3) 提案した系統負荷モデルと電圧静特性の推定値の電力系統解析への適用方法を示した。

以上より、従来よりもきめ細かな系統負荷の設定ができ、電力系統解析の精度向上が期待できる。

今後、負荷機器の単体特性の把握などにより、今回求めた電力種別単位の特性に関する定性的な評価を行うとともに、さらなるデータの蓄積と過渡領域での負荷電圧特性把握（電圧動特性定数、誘導機定数）に関する検討を行う予定である。

最後に本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた（財）電力中央研究所の浅田実氏、山下光司氏、熊野照久氏、及びデータ収集・処理にご協力いただいた（株）近計システムの櫻井通氏、（株）日本オープンシステムズの高山崇氏に厚く御礼申し上げます。

（平成14年2月28日受付、平成14年6月20日再受付）

文 献

- (1) M. Asada and K. Yamashita: "An Analysis of the present Load Characteristic in Japan 60Hz System", *TIEE Japan*, Vol.121-B, No.10, pp.1371-1378 (2001-10) (in Japanese)
浅田 実・山下光司:「わが国60Hz系統における負荷特性の実態分析」, 電学論B, 121, 10, pp.1371-1378 (2001-10)
- (2) C. Concordia and S. Ihara: "Load Representation in Power System Stability Studies", *IEEE Trans. Power Apparatus & Syst.*, 8, PAS-101, No.4, pp.969-977 (1982-4)
- (3) IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance: "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", *IEEE Trans. Power Syst.*, 8, No.2, pp.472-482 (1993-5)
- (4) M. Bonstancy, J. Koplowitz, and C.W. Taylor: "Identification of Power System Load Dynamics Using Artificial Neural Networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, 12, No.4, pp.1468-1473 (1997-11)
- (5) M. Asada, K. Yamashita, and S. Hosoki: "A Study on the Load Voltage and Frequency Characteristics of Electric Appliances", *PSE-99-37* (1999) (in Japanese)
浅田 実・山下光司・細木 訓:「負荷機器の電圧および周波数特性に関する検討」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE-99-37 (1999)
- (6) K. Tomiyama: "Estimation of Voltage Sensitivity of Bus Load for Power System Analysis", *TIEE Japan*, Vol.119-B, No.3, pp.326-332 (1999-3) (in Japanese)
富山勝幸:「系統解析のための静的負荷特性の推定手法」, 電学論B, 119, 3, pp.326-332 (1999-3)
- (7) M. Fauri: "Harmonic Modelling of Non-Linear Load by means of Crossed Frequency Admittance Matrix", *IEEE Trans. Power Syst.*, 12, No.4, pp.1632-1638 (1997-11)
- (8) Y. Nakao, M. Sato, and N. Nakazama: "Measurement and Analysis of Power System Load Characteristic Using P-Q Correlation", 1995 National Convention Record, IEE Japan, No.1313 (1995) (in Japanese)
中尾勇一・佐藤正昭・中澤元丸:「P-Q相関を用いた系統負荷特性定数の測定と分析」, 平成7年電気学会全国大会, No.1313 (1995)
- (9) G. J. Berg: "Power-system load representation", *Proc. IEE*, 120, No.3, pp.344-348 (1973-3)
- (10) 長尾待士・浅田実・内田直之・氏原悦雄・杉浦徳廣・鈴木邦夫:「大幅電圧変動時の電力系統の負荷特性 その1～2」, 電中研報告, 183523 (1984), 183524 (1986)

付 録

1. 電圧静特性に対するリアクタンスの影響

送受電端の電圧静特性の関係式は次のように表される⁽⁹⁾。

$$Kps = Kpr \cdot \frac{1 + \frac{X \cdot Q_l}{V_r^2} + \frac{X^2 \cdot P_l^2}{2V_r^4}}{1 + \frac{X \cdot Q_l}{V_r^2} (Kqr - 1) + \frac{X^2 \cdot P_l^2}{2V_r^4} (2Kpr - 3)}$$

.....(付 1)

$$Kqs = Kqr \cdot \frac{1 + \frac{X \cdot Q_l}{V_r^2} + \frac{X^2 \cdot P_l^2}{2V_r^4}}{1 + \frac{X \cdot Q_l}{V_r^2} (Kqr - 1) + \frac{X^2 \cdot P_l^2}{2V_r^4} (2Kpr - 3)}$$

$$\times \frac{1 + \frac{2X \cdot Q_l}{V_r^2} \left\{ \frac{Kqr - 1}{Kqr} + \left(\frac{P_l}{Q_l} \right)^2 \cdot \frac{Kpr - 1}{Kqr} \right\}}{1 + \frac{X \cdot Q_l}{V_r^2} \left\{ 1 + \left(\frac{P_l}{Q_l} \right)^2 \right\}}$$

.....(付 2)

2. 負荷脱落特性モデル⁽¹⁰⁾

負荷の脱落特性は、系統故障などの瞬時電圧低下による最大電圧低下率 $\Delta V_{\max}$ が、 ΔV_0 以上となると負荷脱落が発生し、 ΔV_m 以上となると脱落負荷量は飽和するといった特性を概ね示していることから、付図 1 のような折線で模擬することとする。

$$\Delta V_{\max} = \frac{V_r - V_{\min}}{V_r} \quad \text{.....(付 3)}$$

$$0 \leq \Delta V_{\max} < \Delta V_0 \text{ のとき, } \Delta Pd = 0$$

$$\Delta Qd = 0$$

$$\Delta V_0 \leq \Delta V_{\max} < \Delta V_m \text{ のとき,}$$

$$\Delta Pd = Ap(\Delta V_{\max} - \Delta V_0)$$

$$\Delta Qd = Aq(\Delta V_{\max} - \Delta V_0)$$

ただし、 $Ap = \frac{\Delta P_m}{\Delta V_m - \Delta V_0}$, $Aq = \frac{\Delta Q_m}{\Delta V_m - \Delta V_0}$

$$\Delta V_{\max} \geq \Delta V_m \text{ のとき, } \Delta Pd = \Delta P_m$$

$$\Delta Qd = \Delta Q_m$$

.....(付 4)

$\Delta V_{\max}$: 最大電圧低下率

$V_{\min}$: 最低電圧値

ΔPd , ΔQd : 有効, 無効電力の負荷脱落率

ΔV_0 : 脱落開始電圧低下率

ΔV_m : 脱落飽和電圧低下率

ΔP_m , ΔQ_m : 有効, 無効電力の脱落上限率

Ap , Aq : 有効, 無効電力の脱落増加率

3. 重み係数

今回重み係数 Wp_j , Wq_j は(付 5), (付 6)式のように与えることとする。

付図 1 脱落特性モデル

app. Fig. 1. Load ramp down model.

$$Wp_j = \frac{n(n-2)}{n \cdot \sum_{k=1}^n Kp_{rk}^2 - \left(\sum_{k=1}^n Kp_{rk} \right)^2} - \frac{\left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n (Kp_{rk} \cdot t_k) - \left(\sum_{k=1}^n Kp_{rk} \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n t_k \right) \right\}^2}{n \cdot \sum_{k=1}^n t_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n t_k \right)^2}$$

.....(付 5)

$$Wq_j = \frac{n(n-2)}{n \cdot \sum_{k=1}^n Kq_{rk}^2 - \left(\sum_{k=1}^n Kq_{rk} \right)^2} - \frac{\left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n (Kq_{rk} \cdot t_k) - \left(\sum_{k=1}^n Kq_{rk} \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^n t_k \right) \right\}^2}{n \cdot \sum_{k=1}^n t_k^2 - \left(\sum_{k=1}^n t_k \right)^2}$$

.....(付 6)

n : 当該送電線における採用データ数

山下 益 功

(正員) 1972 年 8 月 10 日生。1995 年 3 月上智大学理工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月北陸電力㈱入社。現在、技術開発研究所に勤務。主として、電力系統解析に関する研究に従事。

金 尾 則 一

(正員) 1959 年 9 月 19 日生。1984 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月北陸電力㈱入社。現在、技術開発研究所に勤務。同所副課長。主として、電力系統解析に関する研究に従事。

柳 田 孫 肖

(正員) 1957 年 10 月 12 日生。1981 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月北陸電力㈱入社。平成 10 年から技術開発研究所に勤務。現在、石川総合制御所所長。主として、電力系統解析・運用に関する業務に従事。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

—A20 解析技術(2)—

質 疑

座長 佐藤 信之

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：動特性に関する考察・知見はありますか。

A：動特性については現在分析中です。

(2)

Q：気温をパラメータとしたことによるモデル上の利点は何か？

A：実状に近い特性を表現できることです。

応 答

山下 益功・金尾 則一

柳田 孫肖 (北陸電力)

1. 「同セッションでの質疑応答」に対する追加説明

(1)についての追加説明

今回算出した負荷の電圧動特性および時定数につきましては、気温などとの相関はみられませんでした。負荷の動特性は、主に誘導機やインバータ負荷に起因

するものと考えられます。これらの負荷は系統故障時の電圧低下量や継続時間により、電圧動特性や時定数の値が変化します。また、誘導機の多く含む負荷の母線においては、系統故障除去後の電圧の回復が困難になる場合があります、この現象は(9)、(10)式で示される一次遅れモデルでは表現することができません。したがって、負荷の動特性については、誘導機を含む負荷モデルに関する検討を行っております。

(2)についての追加説明

図8に示すように、電圧静特性は気温と相関があることを確認できました。これはエアコンなどの冷暖房機器の稼動に関連があることが示唆されます。表3から電圧静特性の季節別の平均値よりも、気温の一次式(論文では「気温回帰式」)で推定した値のほうが、おおむね実測値との残差分散が小さいため、代表値(電力系統解析で設定する負荷の電圧静特性の値)として適していると判断しました。以上より、需要家単位の負荷機器の構成比や使用状態を細かく調査しなくても、気温をパラメータとすることにより、負荷機器の季節的な変化を反映した電圧静特性を推定できるものと考えております。この結果、電圧静特性を季節別に設定した電力系統解析により系統運用容量(安定度、電圧)を算出すれば、季節別管理による柔軟な系統運用も期待できるものと考えられます。