

전력계통 안정도 해석을 위한 부하모델링의 연구동향

이 중 범

(한국전기연구소 전력계통연구실 선임연구원)

차례

1. 서 론
2. 부하구성 성질 및 모델
3. 부하모델링의 중요성
4. 부하모델링 접근방법
5. 안정도에 영향을 주는 부하특성
 - 5.1 정적 특성
 - 5.2 동적 특성
6. 금후의 부하모델 적용
7. 결 론

1. 서 론

산업의 급속한 발달에 따른 전력수요의 증가로 말미암아 전력계통은 점점 대형화, 복잡화 되어가고 있으며 이러한 추세는 앞으로 더욱 심화 될 것으로 전망되고 있다. 따라서 전력계통은 해석, 계획 및 운용면에서 더욱 높은 신뢰도가 요구되고 있으며, 특히 우리나라와 같이 부하와 전원중심지가 서로 원격거리에 존재하고 있는 경우에는 이러한 공급신뢰도를 높은 수준으로 유지하기 위하여 전력계통 안정도에 대한 연구가 면밀히 수행되어야 한다. 그리고 이를 위하여서는 계통의 동특성에 대한 보다 정확한 이해가 필요하며 계통에 유입되는 어떤 외란에 대한 해석적인 연구결과가 실제계의 응답과 일치하도록 하는 계통의 모델링 및 해석기법에 대한 연구가 있어야 한다.

계통의 동특성 해석에 대한 정확성은 계통에 포함된 각종 구성설비 즉, 발전기, 조속기, 전압조정기, 여자기, 부하 및 Network에 포함되는 여러 설비들을 얼마나 적절하게 모델링 하느냐와 그 해석기법에 달려있다.

과거의 동특성 해석에서는 이러한 모델링을 주로 발전계통 및 Network에 국한하여 실시 하였으며, 계통부하는 부하모델 구성상의 여러가지 어려움 때문에 2차적으로 생각하여 Constant MVA, Constant Z, Constant I로 대부분 모델링 함으로써 비교적 간결하게 취급하여 실시하였다.

그러나 최근에는 부하모델링이 중요시 됨으로써 보다 적절한 부하모델의 연구와 실측 Data의 수집이 요구되고 있는데 이는 발전기 및 제어계의 상세모델이 적용되어 해석의 정확도가 높아짐과 함께 더욱 높은 정확도의 해석결과를 얻으려면 나머지 부하모델의 정확도 향상이 중요한 과제로 대두되었기 때문이다. 한편, 최근에 발표된 연구결과에 따르면 부하의 정특성과 동특성이 전력계통 안정도 해석에 미치는 영향은 매우 중요하다는 사실이 밝혀지고 있으며, 특히 계통의 Poor Damping에 따른 Low Frequency Oscillation 해석문제와 과도안정문제해석 및 사고중 전압저하에 따른 부하탈락과 그 이후의 주파수 변화에 있어서 부하모델이 미치는 영향은 매우 중요한 것으로 제시되고 있다.

2. 부하구성성질 및 모델

전력계통의 부하모선에 접속된 부하는 산업의 발달과 더불어 그 종류도 비례하여 증가 함으로써 수없이 많아지고 있

으며 각각의 부하특성도 더욱 다양해지고 있다.

그러나 이들 부하는 용도별로 가정용 부하, 상업용 부하, 산업용 부하, 건물용 부하, 농업용 부하등으로, 특성별로는 정특성 부하(Static Characteristic Load)와 동특성 부하(Dynamic Characteristic Load)로 대별할 수가 있다. 그런데 전력계통의 부하는 이중 어느 한 요소로 구성 되어져 있는 것이 아니라 여러용도 및 특성의 부하들이 혼합하여 하나의 혼합부하(Composite Load)를 형성하고 있으므로 계통의 부하특성과악은 이 혼합부하가 전압 및 주파수의 변화에 따라 어떠한 특성을 갖느냐에 집약되고 있다. 그리고 전력계통 안정도를 해석하려고 하는 그 시점이 어느 순간이냐에 따라, 다시 말해서 계절, 날씨, 요일, 시간과 함께 외란의 유입지점에 따라 부하구성요소 및 특성들은 각양각색으로 변화하므로 부하모델을 이루고 있는 각 계수들은 따라서 변하게 되며, 더 나아가 모델 그 자체도 변화하게 되는 것이다.

부하모델로서는 보통 전압과 주파수 특성의 정적특성표현으로 유효전력부하 P 및 무효전력부하 Q에 대해

$$P = f_p(V) (1 + K_f \cdot \Delta f)$$

$$Q = f_q(V) (1 + K_f \cdot \Delta f)$$

가 일반적인 모델로서 이용되지만 자주 이용되는 함수형태는 전압특성을 V의 지수함수로 표현하는

$$P = P_0 (V/V_0)^\alpha (1 + K_f \cdot \Delta f)$$

$$Q = Q_0 (V/V_0)^\beta (1 + K_f \cdot \Delta f)$$

의 식으로 나타내기도 하고, 혹은 다항식으로

$$P = P_0 (P_\alpha + P_\beta V + P_\gamma V^2) (1 + K_f \cdot \Delta f)$$

여기서, P_0 , Q_0 는 V가 1(PU)이고, F가 정격치 일때의 값임과 같은 식으로 표현하기도 하며, Q도 같은 형태의 식이 된다.

여기서, α , β 는 전압특성을 표시하는 정수로서 종류별로 대략 열거하면 표 1과 같으며, 이것을 종합한 특성은 위에

표 1. 부하의 전압특성

부 하 종 류	유 효 전 력 (P)	무 효 전 력 (Q)
전 등 전 열	$V^{1.8}$	0
번 압 기	V^2	V^{8-6} (여자분) V^2 (수신편)
유 도 전 동 기	$V^{1.2-0.8}$	$V^{1.8-1.6}$
전 력 용 condenser	0	$-V^2$
동 기 조 상 기	0	$\Delta Q = K(1 - V^{-1.5} \sim -0.5)$
동 기 전 동 기	V^0	$\Delta Q = K(1 - V^{-1.3} \sim -0.7)$

서 언급한 대로 지역, 계절, 시간별로 부하구성이 달라 크게 변동한다. 아울러, 정전력 부하 및 정전류 부하의 경우에는 대폭적인 전압강하시의 부하탈락 고려시에 비현실적인 전류치가 되므로 저전압시에는 Constant Z로서 적용시키거나 두 곡선을 합하여 변경시킨 다음과 같은 식(그림 1참조) 또는 히스테리시스 특성을 이용하는 경우(그림 2참조)도 있다. 이상에서,

$$P = \{P_a V^\alpha f(V) + P_b V (1 - f(V))\} \{1 + K_f \cdot \Delta f\}$$

$$Q = \{Q_a V^\alpha f(V) + Q_b V (1 - f(V))\} \{1 + K_f \cdot \Delta f\}$$

$$\text{여기서, } f(V) = 1/2 \{ \tan h[K(V - V_1)] + 1 \}$$

P_a, β, γ 는 상수이며, f는 주파수 편차(H_z)이고 K_f 는 주파수 특성지수로서 실측결과 0.03~0.05 정도이다.

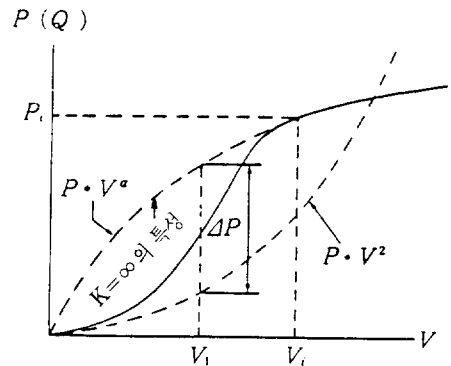
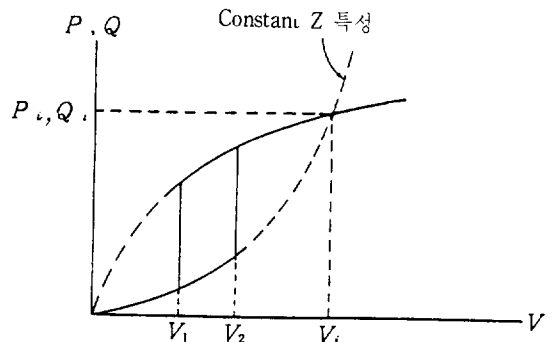


그림 1. 부하특성의 연속곡선화



지금까지 해외에서 연구하여 제시된 자료에 따르면 이러한 계통에서의 부하특성을 파악하기 위하여 특성별, 용도별로 전형적인 단독부하를 선정하여 독립적으로 전압 및 주파수에 대한 유효, 무효전력특성을 파악하고 혼합부하의 적절한 구성으로부터 응답 특성을 파악함으로써 혼합부하특성을

추론해 내는데 이용토록 하였다. 그러나 이는 어디까지나 실험실에서의 부하특성시험으로서 이 시험은 평균적 부하구성의 예측과 각종 부하별 특성의 조합으로 그 특성을 결정지우는 것으로서 실제용 적용상 어려운 문제가 뒤따르게 된다. 따라서 보다 실증적이고 신뢰성이 있는 결과를 추출하기 위해 부하특성을 파악하기 위한 시험장비를 구성한 후 계통의 부하모선에 접속 시킴으로써 실제혼합부하의 특성을 파악하기에 이르렀다고 언급되고 있다.

3. 부하모델링의 중요성

부하모델이 발전기 탈락, 비정상 조건에서의 Long-term Dynamic, 계통붕괴, Oscillation의 Damping등 계통의 동특성에 중대한 영향을 주고 있다는 것은 오래전부터 인정되고 있는 사실이며, 특히 과도안정해석결과는 부하특성에 크게 의존되고 있다고 하고 있다. 그런데 부하모델링은 여러 관점에서 특성상 발전계통의 모델링과는 다르며, 계통에 연결된 모든 부하들이 그렇게 동일하며 간단한 특성을 갖고있지를 않다. 그래서 안정도 해석 결과가 그다지 정확치 못한 이유는 Fault에 의해 발생하는 큰폭의 전압강하 동안에 발생하는 부하특성에 대한 충분하지 못한 정보가 주요인으로 제시되고 있다.

부하모델의 구성을 위해서는 그동안 많은 연구들이 연구기관 및 Utility를 중심으로 이루어져 산업적인 이해를 증진시키는데 크게 공헌하였다. 그러나 부하의 정확한 합성을 추정하기가 어렵고 Data를 구하기가 힘든 동시에 Data 적용상의 어려움 및 모델결과와 Field Test 결과와의 상이성 때문에 많은 Utility에서는 자세한 부하모델을 사용하지 않고 있다. 따라서 대부분의 Utility에서는 부하표현을 기준에 자주 사용하였던 Constant MVA, Constant I, Constant Z 및 이들을 혼합하여 적용시키고 있다. 그림 3은 Constant MVA, I Z에 해당되는 n이 0, 1, 2일 때와 그 이외의 여러 경우의 값에 대해 Power가 어떻게 변화하는가의 특성을 보여 주고 있다.

그림 4, 5, 6, 7은 부하모델의 적용에 따라 그 해석결과 어떻게 달라지는가를 잘 보여주고 있으며 이로부터 부하모델의 중요성을 파악할 수 있다.

즉, 그림 4는 부하를 A, B, C(그림에서 설명) 3종류로 각각 적용시켰을 경우에 나타난 Swing곡선으로서 C일 경우에는 상차각이 계속 증가하며, 그림 5에서는 C경우일 때 전압이 계속 강하함을 알 수 있다. 한편, 그림 6은 Michi-

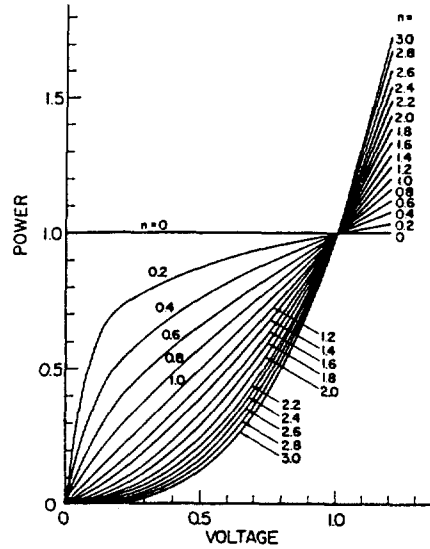


그림 3. P=V일때의 특성곡선

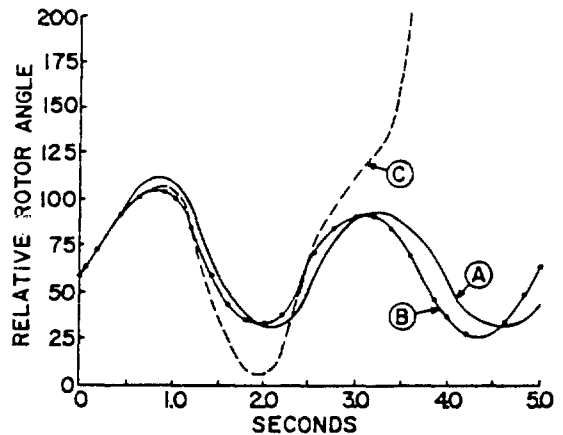


그림 4. Fault 및 발전기 탈락에 의한 원거리 발전기 Swing 곡선

- A: 모두 constant Z 부하
- B: 모두 constant I 부하
- C: P: 50% constant I 부하
50% constant MVA 부하
- Q: 모두 constant I 부하

gan의 Detroit 지역에서 600MW 발전기가 탈락되었을 때 부하표현으로서 유효전력을 Constant Z 및 Constant I로 무효전력은 모두 Constant Z로 표현했을 경우 Ontario의 Niagara지역과 Detroit 지역에서의 평균 상차각들을 보이고 있으며 여기서 유효전력의 표현법에 따라 동기화가 상실되기도 함을 알 수 있다. 그림 7은 Niagara발전소 부

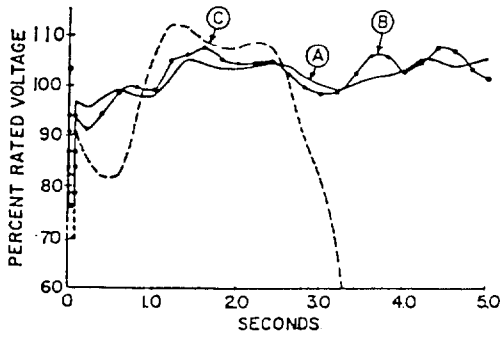


그림 5. Fault 및 발전기 탈락에 의한 원거리 발전기 전압 변동

- A : 모두 constant Z 부하
- B : 모두 constant I 부하
- C : P : 50% constant I 부하
50% constant MVA 부하
- Q : 모두 constant I 부하

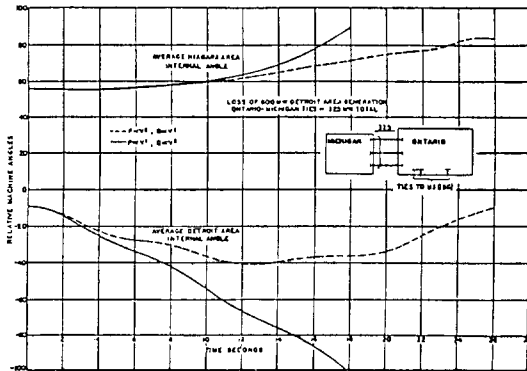


그림 6. 전력-전압특성의 변화에 따른 안정도의 영향

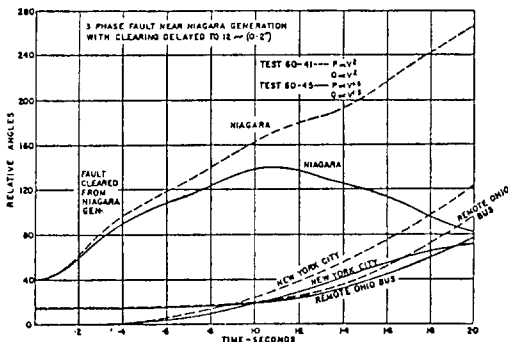


그림 7. Niagara 발전소 근처에서 Fault가 발생하였을 경우 부하표현에 따른 안정도의 영향

근에서 발생된 Fault가 0.2초(12Hz)에서 제거되었을 경우 부하표현에 따라 상차이가 어떻게 변화하는가를 보여주는 것으로 유효, 무효전력 모두 Constant Z로 표현했을 때는 Fault 부근의 발전소는 불안정함을 알 수 있다.

4. 부하모델링 접근방법

계통의 부하모선에 연결된 부하를 모델링하기 위하여서는 첫째 구성성분에 근거한 방법(Component-based Techniques)과 실측에 의한 방법(Field Test-based Techniques)이 있으며, 실측방법도 계획시험(Staged Test)과 상시감시기록(Continuous Monitoring)에 의한 시험으로 나눌 수 있다.

우선, 부하구성성분에 근거한 방법은 그림 8과 같이 개개의 구성성분 모델 및 특성을 구하고 이를 적절한 기법으로 용도별로 Aggregation함으로써 얻는 것으로 보통 Feeder 별 또는 산업, 상업, 주거, 농업 및 건물용등으로 부하를 분류한 후 이들의 전압 및 주파수에 대한 감도계수를 구하여 종합화 하는 것이다. 따라서 각 부하 Type에 대한 상세한 정보가 필요하게 된다. 그러나 이것은 부하구성 Data 및 특성이 특별한 계통을 제외하고는 폭넓게 변화하지 않으므로 전계통에 대해 한번에 개발될 수 있으며 모델링 절차도 그렇게 곤란하지는 않지만 계통내에 존재하고 있는 수많은 부하 Type을 합성 시킨다는 것은 비현실적일 수가 있고 부하구성의 상세한 조사가 필요하며, 또한 부하는 정적부하와 동적부하가 서로 존재하고 있으므로 모두 동일한 형태로 합성시키기에는 어려움이 뒤따르게 된다.

따라서, 실제로 이 방법을 적용하는 것은 큰 공장부하와 발전소를 제외하고는 곤란한 것으로 지적되고 있다.

한편, 실측방법중 계획시험은 주로 전압을 변동시키는 것으로서 그림 9와 같이 부하에 인위적으로 변압기 Tap changer, 무효전력원등을 공급시켜서 전압변동을 가한 후 그때의 부하특성을 파악하여 모델을 구성하는 방법이다. 그런데 이 전압 변동은 수용가의 큰 피해가 예상됨으로 실시하기에 많은 어려움이 뒤따르게 된다. 한편, 표 2는 미국의 Ontario 전력회사에서 여러지역별, 시간별로 계획시험에 의해 얻어진 부하모델계수의 결과이다.

그리고, 상시감시기록에 의한 시험은 Fault동안 또는 Capacitor 투입과 같은 계통의 일상운용에서 일어나는 소규모 외란에 대해 부하특성을 기록할 수 있는 것으로 먼저 부하를 특성별로 나눈 후 그림 10과 같은 부하특성기록장치를

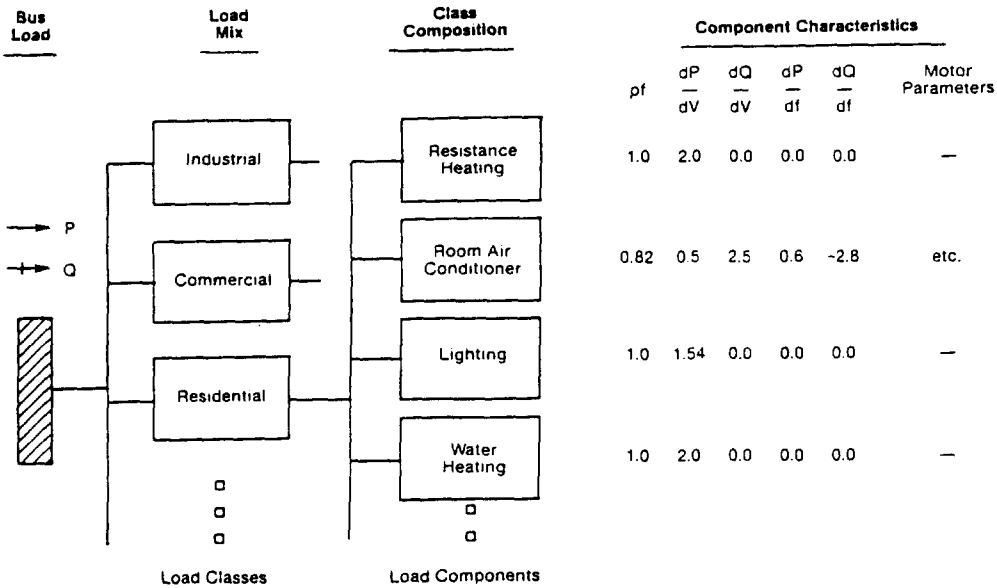


그림 8. 부하구성 성분에 근거한 부하 모델링

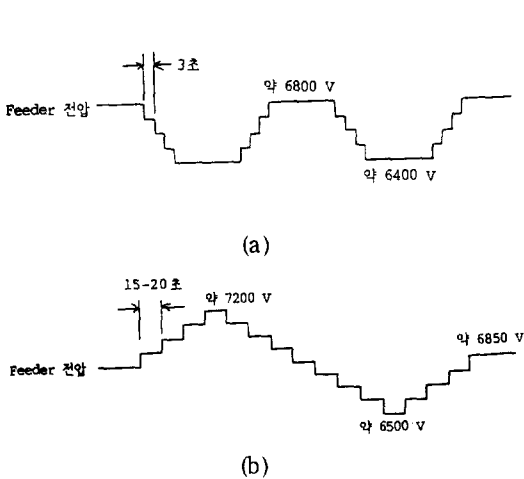


그림 9. 계획시험에서 전압변동방법의 한 예

외란 유입예상지점에 설치하여 기록을 실시하고 이로부터 얻은 풍부한 Data를 갖고 계통부하의 정적 및 동적특성을 깊이 파악함으로써 부하모델을 구성하게 된다. 그런데 이 방법은 원하는 특성을 파악기 위한 Data를 얻기 위해 오랜기록기간이 소요된다는 단점도 있지만 전압, 전류, 주파수가 미리 지정한 값(Pre-Specified Value)을 넘는 외란일 경우에는 이 외란이 유입되기 전의 응답 Data를 포함하여 일정범위의 Data를 Magnetic Tape에 저장하여 분석하는 방법

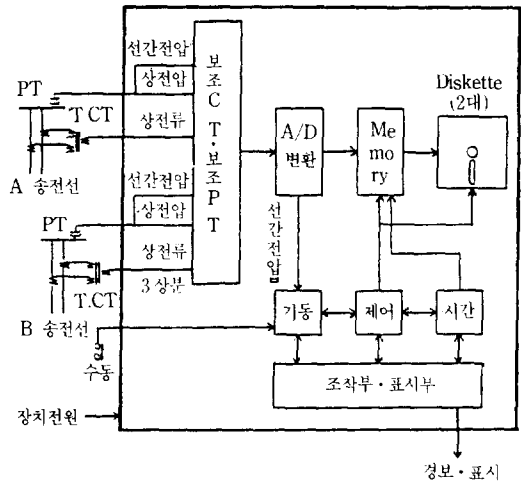


그림 10. 부하특성기록장치의 Block Diagram

으로서 특별히 부하의 동특성 파악에 효용성이 있어 해외에서 자주 사용되고 있는 기법이다. 따라서 이 경우에는 한계치(Threshold Value)의 적절한 지정 및 수개월간의 예비측정이 필요하겠으며, 이러한 실측방법은 지역별, 계절별, 시간대별로 수많은 실측 Data를 수집하고 통계적인 처리를 통해 얻은 적절한 수식모델들로부터 평균적인 정수를 구성하는 작업이 필요하게 된다.

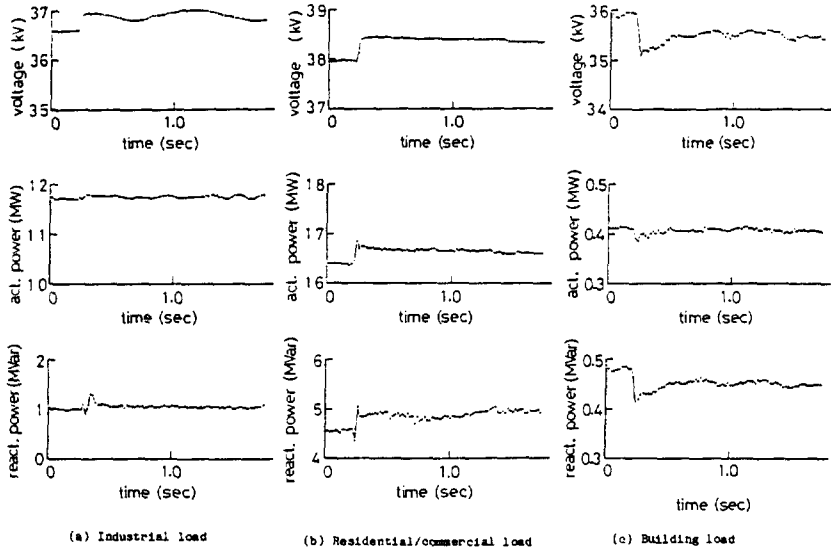


그림 11. 미소전압 변동시의 전력응답특성

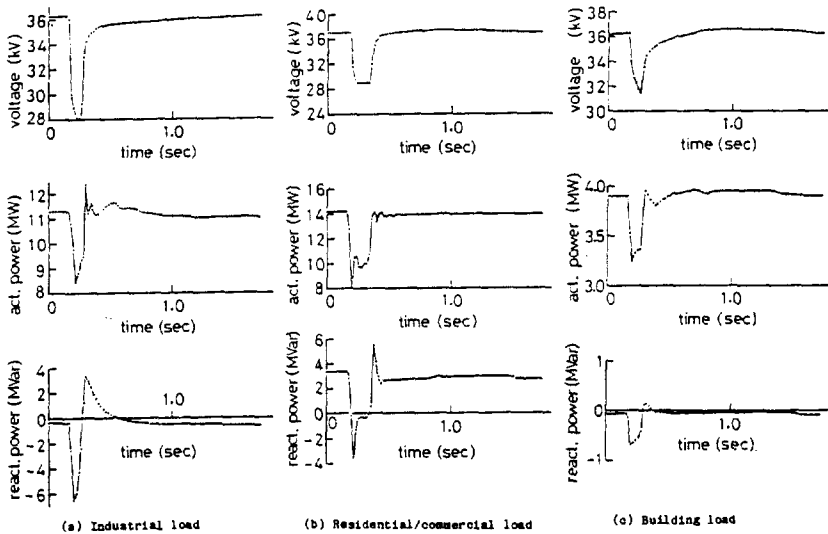


그림 12. Fault에 의한 급격한 전압변동시의 전력응답특성

계통은 안정하며, $dQ/dF < 0$ 인 경우가 적절하다.

5.2 동적특성

계통에서는 많은 동적 외란들이 발생하며, 이러한 외란에 대한 응답은 그 순간에 일어나지 않고 다소 시간이 지연되어 발생한다. 따라서 외란의 성질 및 연구대상의 목적에 따라 어느 범위의 응답시간에서 동특성은 중요하다.

5.2.1 전동기 부하의 동특성

주로 전동기가 동적으로 광범위하게 연구되고 있는 부하이며, 특히 계통부하에서 유도전동기가 전동기부하의 대부분을 차지함으로써 유도전동기에 대한 상세모델 및 간략모델들이 이미 연구되었다. 한편, 부하군에 전동기의 종류 및 수는 무수히 많으므로 이들을 Single-Unit모델로 간략화하여 1기로 등가표현하는 기법이 제안되고 있다. 그러나, 전

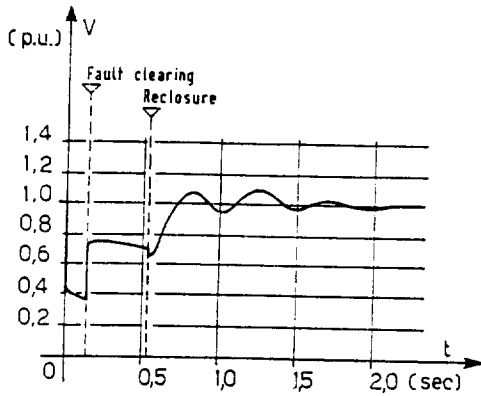


그림 13. Turkey의 전력회사에서 3상 Fault시 154kV 모 선에서의 전압변동

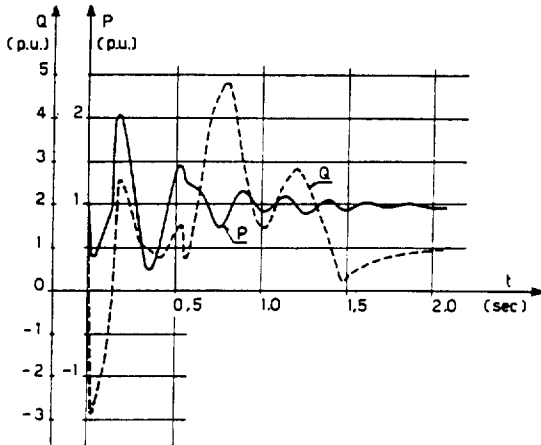


그림 14. 그림 11과 같은 전압변동에 대한 유도전동기의 응답특성

기적, 기계적 파라미터의 상이성과 여러전압 Level로서 배전계통에 분산되어 있으므로 아직 전동기를 정확히 Aggregation 할 수 있는 표현법이 없으며, 또한 Single-Unit 모델로 표현하기도 쉽지가 않다.

전동기 부하에 유입되는 전 유효전력은 전압은 물론이고 계통주파수 뿐만 아니라 주파수 변화율에 따라서, 그리고 급작스런 외란으로 전동기 속도에 빠른 변화를 줄 것으로 예상될 때에는 계통규모에 따라서는 각 전동기의 관성을 무시할 수가 없으므로 중, 소형 유도전동기 부하는 안정도에 중대한 영향을 줄 수가 있기 때문에 Total 관성으로 처리해야 한다. 그림 14는 그림 13과 같이 급격한 전압변동시에 유도전동기의 동특성을 나타낸 것으로 무효전력이 유효전력보다 더욱 Dynamic한 특성을 보이고 있다.

그 이외의 Fault가 Clear될 때까지 Slip이 어느정도 변할 것이냐와 전압이 대략 0.75Pu 이하인 전압에서는 탈락되므로 저전압시 전동기 보호를 위한 Trip장치의 동작, 전압이 회복되어도 바로 재기동되지 않는다는 조건 및 방전등의 재점등, 냉장고의 Thermostat Control 등에 주의를 기울여야 하며 대부분이 Reactance 성분인 Network의 영향도 고려해야 할 것이다.

6. 금후의 부하모델 적용

현재 계통해석 및 운용시 조류계산에서는 부하를 Constant MVA로 취급함으로써 부하의 전압감도를 표현하지 않고 시행한다. 그러나 정상 상태치가 아니고 상정사고 후의 조류와 전압과의 관계에 대한 연구에서 부하의 전압감도는 매우 중요함으로 조류계산에서는 부하를 전압의 함수로서 표현하면 보다 신뢰할만한 결과를 얻을 것이다.

한편, 과도안정도 연구는 계통의 고장 및 발전기 탈락등과 같은 큰 외란이 발생될 때 동기화가 유지되는가에 대해 계통에 정보를 주는 것으로서 지금까지는 보통 해석시 부하를 전압과 주파수변화의 정적모델로 취급하여 사용하지만 앞으로는 대형 산업용 및 발전소 모델링에서 사용하였던 Dynamic Induction Motor 모델링의 사용에 대한 연구가 요망된다.

7. 결 론

부하모델링을 위하여서는 보다 많은 부하 Data를 용도별, 계절별, 시간별로 확보하여 일단 Common Data Bank를 구성하는 것이 바람직하며, 이와 함께 금후의 추세가 부하모델은 "General Purpose Model"을 얻기가 어렵지만 그래도 Field Test를 통해 얻는 것이 보다 신뢰성이 있다고 평가되고 있다. 그러나 문제는 이 Test로 부터 얻은 각종 Data를 여하히 분석하여 모델링하느냐에도 달려있으므로 전압과 주파수에 대한 정확한, 그러나 복잡하여서 사용하기에 어렵지 않은 모델을 구성하는 것이 중요하다고 하겠다. 그리고 지금까지는 대부분이 전압의존성을 강조하고 있는 반면 주파수 의존성의 강조는 미약하였으나 주파수의 존성도 동시에 강조해야 할 것이고 특히 동기조상기, 전력용 콘덴서등에 의한 무효전력보상과 변압기 특성에 의한 무효전력의 변화특성에 유의해서 부하모델을 세워야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) S. Ihara, G. S. Paulsen, et al., "Bismarck Load Behavior During Field Tests", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4540-4545, Nov. 1981.
- 2) M. H. Kent, W. R. Schmus, et al., "Dynamic Modeling of Loads in stability studies", IEEE Trans., Vol. PAS-88, May 1969.
- 3) P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, U. S. A., 1977.
- 4) IEEE Comittee Report, "Procedures for the Exchange of Power Plant and Load Data for Synchronous Stability Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 7, pp. 3229-3245, July 1981.
- 5) T. Nagao, et al., "Data Acquisition and Handling System for Transient and Dynamics of Power System", CRIEPI, Electrical Engineering Lab., Rep. No. 184043, 1985.
- 6) T. Nagao, H. Kaminosono, "New Representation of Load the Power System Analysis(Part 2)", CRIEPI, No.72118, 1973.
- 7) E. Vaahedi, et al., "Load Models for Large-Scale Stability Studies from End-User Consumption", IEEE Trans., Vol. PWRS-2, No. 4, pp. 864-872, Nov. 1987.
- 8) F. Iliceto, A. Ceyhan, et al., "Behavior of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies, Field and Laboratory Tests", IEEE Trans., Vol. PAS-91, pp. 154-163, Nov./ Dec. 1972.
- 9) T. Ohyama, K. Nishimura, et al., "Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 11, pp. 3064-3071, Nov. 1985.
- 10) Computer Analysis of Power Systems Working Group of the Computer and Analytical Methods Subcommittee Power System Engineering committee, "System Load Dynamics-Simulation Effects and Determination of Load Constants", IEEE Trans., Vol. PAS-92, pp. 164-173, Mar./ Apr. 1973.
- 11) W. W. Price, K. A. Wirgau, et al., "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", IEEE WM 080-5, 1987.
- 12) C. Concordia, S. Ihara, "Load Representation in Power Stability Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 4, pp. 696-977, April 1982.
- 13) G. Shackshaft, P. H. Ashmole, "The Influence of Load Characteristics on Power System Performance - A. C. E. G. B. Viewpoint", CIGRE, 31-20, 1978.
- 14) M. M. Aldel Hakim, G. J. Berg, "Representation of Induction Motor Groups", IEEE Trans., Vol. PAS-95, No. 1, pp. 155-165, Jan./ Feb. 1976.
- 15) P. C. Krause, et al., "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", IEEE Trans., Vol. PAS-84, No. 11, pp. 1038-1053, Nov. 1965
- 16) W. T. Briggs III, "Modeling of the Fundermental Components of Power system Load", Ph. D Dissertation, U. T. A April 1979.
- 17) EPRI RP 849-3, "Determining Load Characteristics for Transient Performances", May 1979.