

EMTP MODELS를 이용한 부족주파수 계전기 동작 구현

안상필*, 허정용**, 김철환**, 박남옥*
 한국전기연구원, 성균관대학교*

The Implementation of Operation for Underfrequency Relay using EMTP MODELS

S.P. Ahn*, J.Y. Heo**, C.H. Kim**, N.O. Park*
 Korea Electrotechnology Research Institute*, Sungkyunkwan Univ.**

Abstract - This paper propose methods to implement operation of underfrequency relay using EMTP MODELS.

Simulation results shows the operation of the frequency relay as well as the status of generator and power systems.

The simulation method described in this paper can thus be employed as a very useful tool in the testing of frequency relay algorithms and/or in the development of any new ones.

1. 서 론

전력계통의 상호연결의 발달에 따라 계통 외란에 대한 보호의 중요성이 증가하고 있다. 특히 발전기 상실이나 이웃하는 계통의 사고차단에 의해서 부하-발전 불평형이 초래될 수 있다. 만약 계통의 부하가 사용가능한 발전량을 초과하면, 즉 극심한 과부하가 발생하면 주파수는 급격히 감소한다. 이는 계통의 안정성에 심각한 손상과 함께 광역정전까지 파급될 수 있다. 특히 스팀 터빈 같은 회전기기는 정격 주파수 보다 아주 적은 몇 % 아래에서도 안전하게 동작할 수 없다. 따라서 실제계통에서는 부족주파수 계전기를 적용하여 발전과 부하의 균형을 회복시키기 위해 부하를 차단하고 있다.

부족주파수 계전기(81번)는 계통 주파수가 정격주파수 아래의 지정 값 이하로 감소하였을 때 자동적으로 부하를 차단하는데에 적용된다. 이 주파수계전기는 계통 붕괴를 막고 또는 경험적인 주요한 정전을 막기 위해 부하와 발전 사이의 균형을 회복시키면서 설정된 차단정책 단계에 따라 선택된 부하를 차단시킨다 [1, 2].

본 논문에서는 모션에서 계전기로 검출 가능한 순시전압파형을 DFT로 분석하여 전력계통의 계통주파수를 추정하였으며, 추정된 계통주파수를 우리나라 부족주파수 운영정책의 1단계에서 세가지의 상정시나리오를 구성하여 그 동작상태 및 발전량과 부하량을 분석하였다.

또한 앞에서 제시된 모든 시뮬레이션은 PSS/E로도 가능하지만, 전세계적으로 비상업적으로 사용되는 과도현상해석프로그램인 EMTP를 사용하였으며, 특히 계전기의 알고리즘 부분은 실제계통의 데이터를 인터페이스할 수 있는 기능을 지닌 MODELS 언어를 이용하여 구현하였다.

2. 본 론

2.1 부족주파수 계전기

정격주파수로 운전 중인 전력계통에서 대용량 발전기의 탈락이 일어날 경우 계통주파수는 저하하게 되며, 중조류 송전선로가 고장으로 차단되어 계통이 분리될 경우 분리된 두 개의 계통은 각 계통내의 발전력과 부하량의 불평형이 나타나 주파수는 상승 또는 저하하게 되지만 이때에 계통주파수는 운전 중인 발전기의 조속기의 응용

과 부하의 주파수 특성에 따라 일정한 값으로 안정을 찾게 된다. 그러나 계통내의 발전력과 부하량의 심한 불균형으로 계통주파수가 크게 저하하면 대용량 화력기의 터빈날개(moving blade)가 과도한 진동으로 인하여 절단될 수 있을 뿐 아니라 발전기의 보조기기들의 출력감소 등으로 정상적인 발전을 할 수 없어 추가로 계통에서 탈락함으로써 주파수 저하는 더욱 심해져서 결국 전계통의 정전사고로 진전될 수 있다.

이 경우에 대비하여 적절한 주파수 탭(tap)을 갖는 부족주파수 계전기와 필요에 따라 타이머(timer)를 조합하여 몇 단계로 나누어 일정량의 부하를 차단함으로써 주파수를 회복시키는 방법이 적용된다. 우리나라에서는 1965년에 부산화력 1, 2호기 운전에 대비하여 반한시성 유도원판형 저주파수계전기 24대를 설치하고, 총계통부하의 36.1%를 59.5Hz 로부터 6단계 주파수로 나누어 차단토록 적용하기 시작하였다. 그 후 1970년대 말 전력부족으로 인한 저주파수계전기의 빈번한 동작과 원자력등 대용량 발전기의 계통 병입에 따라 수차례의 검토와 수정을 거쳐 최고 58.8Hz로부터 0.2Hz step의 8단계 주파수 tap에서 총 계통부하의 47%를 차단토록 조정되었으며, 80년대 이후 저주파수 계전기는 대부분 정밀도와 신뢰도가 높은 디지털형으로 교체되었다. 현재는 다음 표 1과 같이 부하차단량이 계통주파수 58.8Hz에서 57.8Hz까지 6단계로 계통수요의 41%까지 차단되게 되어 있다. 추가적으로 반도체형(solid-state) 부족주파수 계전기에 대해서는 부족전압 방지 기능이 계통의 안전성을 높이기 위해 포함되어 있다. 계전기들은 주파수의 감소에 따라 적은 증가에도 부하가 확실히 차단될 수 있게 하기 위해 다중 세팅을 가지고 있다.

표 1 부족주파수 계전기(UFR) 부하차단단계

| 주파수 | 부하차단단계 |
|---------|------------------|
| 60.00Hz | 표준주파수 |
| 59.8Hz | 정상동작제한치(하한) |
| 58.8Hz | 1단계 6%, 12초 후 4% |
| 58.6Hz | 2단계 7% |
| 58.4Hz | 3단계 7% |
| 58.2Hz | 4단계 6% |
| 58.0Hz | 5단계 6% |
| 57.8Hz | 6단계 5% |
| 부하차단합계 | 41% |

2.2 부하차단(Load shedding)

일반적으로 부하차단은 변전소에 설치된 부족주파수계전기에 의해 동작한다. 그리고 주파수가 위험한 레벨을 초과하여 감소하지 않도록 저지하기 위해 필요한 정도 이상으로 불필요한 부하가 차단되지 않도록 확실하게 하기 위하여 부하는 몇 개씩 주파수 단계에 따라 차단된다. 부하복귀는 부하차단과 반대의 과정이다. 주파수가 정상

값으로 회복됨에 따라 부하도 복구되고, 이 때 부하차단과 복구 계전기 사이에는 충분한 협조 지연을 가지면서 단계적으로 부하는 복구된다. 다음 그림 1은 주파수에 독립적인 일정한 부하와 주파수에 의존적인 부하가 존재할 경우에 발전부족에 의한 전력계통에서의 주파수 감소 경향을 보여주고 있다.

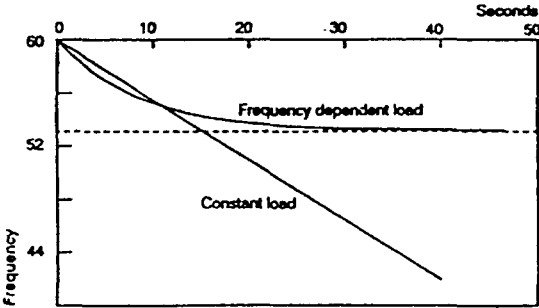


그림 1 발전부족에 의한 계통주파수 감소

부하차단기법(load shedding scheme)은 충분한 운전예비력여유분(spining reserve margins)이 부족하거나, 부족한 발전력을 보상하기 위해 상호 연결된 계통에서 많은 전력을 가져옴으로써 인접연결(tie) 선로용량이 부족한 전력계통에서 최근 매우 중요해지고 있다. 특히 부하차단에 대한 선행정책이 미국의 North American Electric Reliability Council(NERC) 같은 전력기술공동체의 운전위원회에서 정의가 되어져 왔다.

부하차단 계전기(부족주파수 계전기능 포함)에는 전자기계식(electro-mechanical), 반도체식(solid-state), 또는 디지털식(computer based)이 있다. 측정계기가 셋팅치와 동일한 주파수를 인식하고, 주파수가 셋팅치를 지나 계속 감소한 후 얼마 정도의 시간이 지난 후에 계전기는 동작한다. 차단명령 지시 후에 계전기 동작시간, 지연시간, 차단기 트립시간 등을 총 더하면 약 10 사이클 또는 그 이상이다.

이러한 부하차단기법은 본래의 설계 상정계산이 정확하다는 정도에만 의지하기 때문에, 발전기 터빈의 손상을 막기 위해서는 부수적인(추가적인) 보호가 필요하다. 최근에는 대용량 발전설비의 발전 부족(deficiency)이 자동발전제어(Automatic Generator Control-AGC)에 사용되는 Area Control Error(ACE) 같은 측정치를 통하여 정확히 측정될 수 있다. 여기서는 컴퓨터 계전기 변화값에 대한 빠른 응답으로 인접연결 선로의 주파수와 조류를 정확히 측정할 수 있고, 이러한 정보가 발전-부하 불균형(imbalance)이 정해지는 중앙제어센터로 전송된다. 중앙직접식 부하차단 및 복구 기법은 계통의 주파수가 실제적으로 저하되길 기다리지 않고 수행될 수 있다. 이 기법은 중앙제어센터와 인접연결 선로영역 뿐만 아니라 부하제어가 수행되는 배전변전소까지 연결되기 위해 고용량의 통신링크가 필요하다는 것이 명백하다.

2.3 DFT를 이용한 계통주파수 추정방법 [3,4]

전압 파형을 DFT로 분석하면 전압의 페이지를 계산할 수 있다. 이산 입력신호가 $v(k)$ 이고 한 주기 동안의 샘플 수를 N 이라고 하면, 이 신호를 이산푸리에변환(DFT) 한 식은 다음 식 (1)과 같다.

$$V(n) = \sum_{k=0}^{N-1} v(k) W_N^{nk} \quad (n=0,1,2,\dots,N-1) \quad (1)$$

여기서, $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ 이다.

$v(k)$: 전압의 샘플링 값
 N : 샘플링 수

$n=1$ 일 때, 기본파를 추출한 페이지식은 다음 식(2)과 같다.

$$V(1) = \sum_{k=0}^{N-1} v_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} v_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (2)$$

여기서, $v_k = v[n-(N-1)+k]$ 이다.

페이지 위상각의 각 주파수는 다음 식 (3)과 같다.

$$\omega = \frac{\arg[V_k] - \arg[V_{k-1}]}{T} \quad (3)$$

여기서, $\arg[V_k] = \tan^{-1}\left\{\frac{\text{Im}[V_k]}{\text{Re}[V_k]}\right\}$

ω : 신호의 각 주파수 성분 [rad/s]
 T : 샘플링 간격 [s]

식 (3)과 같이 페이지 위상각의 변화율을 계산하여 주파수 성분을 추정할 수 있다.

3. 시뮬레이션

3.1 모델 계통

부족주파수 계전기 동작 구현을 위해 시뮬레이션에 사용된 계통은 다음 그림 2와 같다. 계통 전압은 345kV이고 동기발전기 G1이 연결된 BUS 1에서 BUS 2를 향하여 조류가 흐른다. 부하 L1은 1000MVA, LS는 100MVA이며, LL은 시나리오에 따라 부하량이 다르게 지정되어 있다.

동기 발전기 G1은 EMTP Type-59 동기기 모델과 TACS를 사용한 조속기, 여자기 모델을 사용하여 22kV 전압과 6300MVA 용량의 올진 N/P를 모델링 하였다. 동기발전기 G1의 초기 위상각은 20도로 설정하였다. 선로의 길이는 100km이고 기준용량은 100MVA로 계산하였다.

부족주파수 계전기의 알고리즘은 EMTP에서 받은 전압값을 이용하여 MODELS 내에서 처리하였으며, submodel에서 부족주파수 계전기로 트립신호를 발생시켜 계통의 스위치를 제어하여 부하차단을 수행하였다.

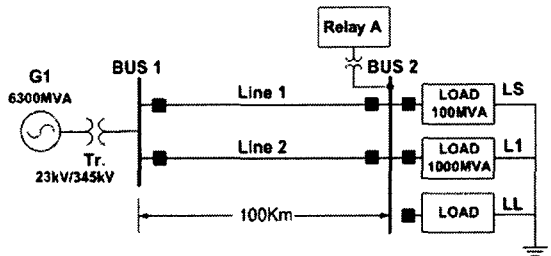


그림 2 모델 계통

3.2 상정 시나리오

부족주파수 계전기를 모의하기 위해 L1, LS 부하는 상시 연결되어 상태에서 시뮬레이션 시작 후 1초 후에 부하 LL이 BUS 2에 연결이 되어 부하량이 증가하게 된다. 그 후 주파수 저하를 감시하다가 주파수가 1단계 제한치인 58.8Hz 보다 내려가게 되면 0.1초 간격 후에 LS 부하가 차단되게 된다.

본 논문에서 상정한 시나리오를 정리하면 다음 표 2와 같이 세가지 시나리오로 분류할 수 있으며, 각각의 경우 부족주파수 계전기 및 발전량 부하량이 어떻게 변하는가를 시뮬레이션 하여 분석해 보도록 하겠다.

표 2 부족주파수 계전기 동작 상점 시나리오

| No. | 부하상태 | 주파수 | 과급상황 |
|-----|---------------------|-------------|---|
| (1) | 100MVA 증가 (LL투입) | 감소 회복 | • 주파수 자동회복 |
| (2) | 600MVA 증가 (LL투입) | 감소 (1단계) | • 부하차단 미실시 • 주파수 회복 느림 |
| (3) | 600MVA 증가 (LL투입) | 감소 (1단계) | • 부하차단 실시 (100MVA LS차단) • 주파수 회복 빠름 |

3.3 시뮬레이션 결과 분석

(1) 주파수 자동회복

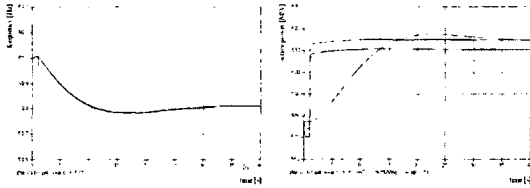


그림 3 주파수 변화

그림 4 발전량과 부하량 관계

그림 3은 부하량이 100MVA 증가될 경우 주파수 변화 그래프로 부하증가량이 적으므로 주파수는 약 59.78Hz 정도 까지만 감소하게 된다. 그림 4에서는 부하증가에 따라 발전기의 출력(전기적인 출력)이 증가하고, 이에 반해 발전기의 입력(기계적인 입력)은 그 응답속도에 의해서 서서히 증가하는 것을 알 수 있으며 그 기간동안은 주파수가 감소가 되다가 기계적인 입력과 전기적인 출력이 동등하게 수렴하면서 주파수가 유지되는 것을 알 수 있다. 전기적인 출력의 상단 그래프는 발전단(BUS1)에서의 출력이고 하단 그래프는 부하단(BUS2)의 출력으로 선로의 손실만큼 전기적인 출력이 감소되는 동작을 이해할 수 있다.

(2) 부하차단 미실시 후 주파수 회복 불가

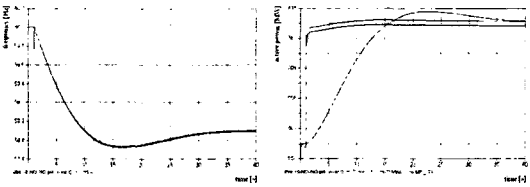


그림 5 주파수 변화

그림 6 발전량과 부하량 관계

부하가 급격히 증가함(600MVA)에 따라 주파수가 부하차단 1단계에 해당하는 58.8Hz 이하로 감소하였다. 이때 부하차단은 하지 않으면 주파수가 58.8Hz 미만에 약 13초 이상 머무르게 된다.

(3) 부하차단 실시 후 주파수 회복

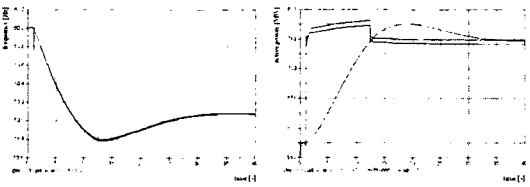


그림 7 주파수 변화

그림 8 발전량과 부하량 관계

그러나, 부하차단을 실시하면 즉시 주파수가 58.8Hz 이상으로 회복되는 것을 알 수 있으며, 이에 따른 전기적 출력의 감소가 그림 8과 같이 나타나서 기계적인 입력의 응답이 쉬워지는 장점이 있다. 이를 그림으로 비교하여보

면 다음 그림 9와 같으며, (2)번과 (3)번 시나리오를 비교하여 발전기의 기계적 입력을 비교하여 보면 다음 그림 10과 같이 부하차단을 실시하였을 경우 기계적인 입력의 응답속도가 현저히 빠른 것으로 분석할 수 있다.

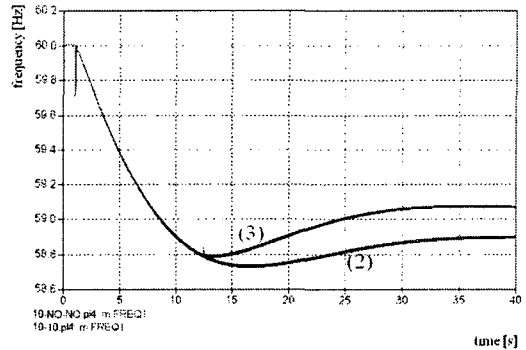


그림 9 주파수 변화 비교

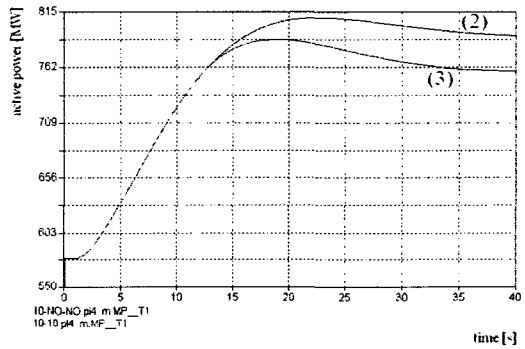


그림 10 발전량(기계적 입력) 변화 비교

4. 결 론

본 논문에서는 부하차단을 위한 부족주파수 계전기를 EMTP의 MODELS 기능을 이용하여 구현하고, 부족주파수 발생시 부하차단 및 전력계통의 상태를 분석하였다. 또한, 제시된 시뮬레이션 기법은 계전기의 알고리즘 개발이나 성능시험을 위하여 저렴하고 신속하게 사용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

향후 주파수 감소율(rate of decay: df/dt)을 이용하여 부족주파수를 검출해 내는 알고리즘도 구현될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술원의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.H. Horowitz, A.G. Phadke, "Power System Relaying", Research Studies Press Ltd., pp.251-257, 1992.
- [2] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems", John Wiley & Sons inc., pp.266-267, 1993.
- [3] A.G. Phadke, J.S. Thorp, "A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasor, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency", IEEE Trans. on Power System, vol. 102, no. 5, pp. 1025-1034, May, 1983.
- [4] T. Lobos, J. Rezmer, "Real Time Determination of Power System Frequency", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 46, no. 4, pp. 877-881, August 1997.