

단독계통의 주파수 제어를 위한 자동발전제어(AGC) 특성 분석 및 새로운 제어전략

論 文
54A-11-5

Evaluation of AGC Characteristics and a Novel AGC Control Strategy for Independent Power Systems

崔承鎬* · 黃教益* · 全瑩煥†
(Seung-Ho Choi · Kyo-Ik Hwang · Yeonghan Chun)

Abstract - One of the roles of AGC is to regulate the frequency of power systems. AGC is also used to control the frequency of Korean Power System. AGC control strategies depend on system characteristics and the requirements of the systems to which those are applied. Korean Power System consists of one control area and does not have tie-lines. In this research, an AGC control strategy is suggested to avoid conflict with governor dynamics and to enhance frequency recovery. It shows good performance for regulation and frequency recovery. This control strategy is expected to be applied to New EMS in KPX to get reasonable AGC regulation and frequency recovery performance.

Key Words : AGC, Governor, Control Strategies, Governor Droop, Bias Factor

1. 서 론

조속기와 AGC(Automatic Generation Control)는 대부분의 전력계통에서 주파수를 60Hz(유럽, 일본의 관동 지방은 50Hz)로 유지하기 위한 수단으로 이용되고 있다. 영국이나 뉴질랜드와 같이 주파수 제어에 AGC를 사용하지 않고 조속기만으로 주파수를 제어하는 계통도 있으며, AGC를 사용하고 있는 북미와 같이 대규모 계통이 연계되어 있는 경우는 발전기가 탈락하더라도 주파수 변동에 미치는 영향이 미미하고 ACE(area control error)를 이용한 연계선로의 조류 제어와 동시에 정상상태 주파수 제어가 목적이므로 상정사고 발생 시 주파수 회복을 목표로 하는 우리나라와 같은 단독 계통의 주파수 제어를 위한 운영과는 많이 다르다. 따라서 단독 계통에서의 조속기와 AGC의 주파수 제어 활용 방안은 계통의 특징을 분석하여 그에 따른 제어방법론을 확립하는 것이 매우 중요하다[1].

특히, 전력시장 개설 이후 계통의 자동제어에 의한 주파수 제어가 전력시장 체제에서 계통 운용의 기본이 되기 때문에 조속기와 AGC를 활용한 주파수 협조 제어가 매우 중요하다. 또한 주파수 제어를 기술적으로 어떻게 구현할지는 주파수 제어 보조서비스의 카테고리 분류와 밀접한 관련이 있기 때문에 앞으로 전력시장의 발전에 따른 보조서비스의 상세 분류를 위해 주파수 제어 방법론의 체계적인 확립이 필요하다. 현재의 CBP(cost based pool) 전력시장의 주파수제어 보조서비스는 발전기의 속도조절에 의한 기여도 산정과 이에 따

른 보상, 그리고 AGC 기능이 있는 발전기와 없는 발전기로 분류하여 보상하고 있으나, 이에 대한 개선이 요구되고 있는 만큼 주파수 제어를 위한 기술적인 방법론 확립이 필요하다.

본 논문에서는 발전기 탈락이나 부하의 급변과 같은 상정사고 발생 시 주파수 제어가 문제가 되는 단독계통에서 조속기와 AGC의 주파수 제어에 대한 역할 분담에 대해서 고찰하고, 새로운 제어 개념의 도입 필요성과 방법론에 대해서 다루고자 한다.

2. 본 론

2.1 조속기의 주파수 제어 기능 분석

2.1.1 과도 상태 특성

상정사고 발생 시 발전기의 주파수 제어는 시간대에 따라 그 특성이 다르다.(그림 1 참조)

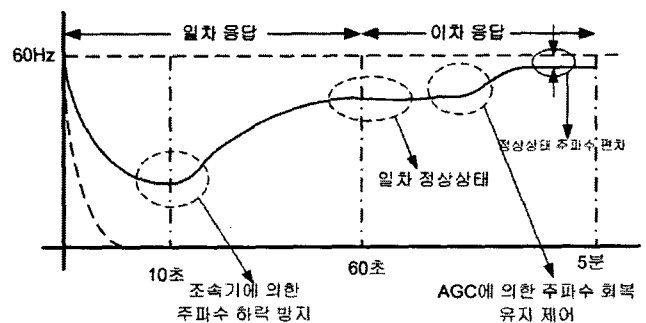


그림 1 조속기 및 AGC에 의한 응답 특성
Fig 1. Governor and AGC response

† 교신저자, 正會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 助教授 · 工博
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

* 學生會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 碩士課程
接受日字 : 2005年 9月 9日
最終完了 : 2005年 9月 29日

그림 1에서와 같이 상정사고가 발생 한 직후에는 빠른 응답 특성을 가지는 조속기가 주파수 하락을 방지하는 주 역할을 담당한다. 이 특성을 조속기의 일차 응답¹⁾이라고 정의하며 최저 주파수까지 이르는 시간은 대략 10초 동안이 된다. 10초 이후에는 주파수가 하락을 정지하고 회복하는 단계이며, 보일러 추종 제어나 터빈 추종제어 설비가 갖추어져 있지 않은 보통의 기력 발전기의 경우 대략 1분-2분 정도까지 출력을 유지할 수 있으며, LFC(load frequency control)에 의한 응답은 이 때에는 거의 이루어지지 않는다. 이러한 과도 특성은 발전기의 속도조정을 뿐 아니라, 발전기의 보일러, 터빈의 다이내믹스가 큰 영향을 미친다.

만약 기력 발전기의 대부분이 보일러 터빈 협조 제어 설비를 갖추고 있다고 하더라도, 빠른 시간 내에 응동해야 하는 일차 응답과는 달리, 이차 응답에서는 발전기의 경제성을 고려한 출력 배분이 필요하기 때문에 이차 응답 시기에 충분한 발전기 출력을 보장할 수 없는 조속기만의 제어 보다는 AGC를 이용하여 경제성을 고려한 출력 조정이 필요하다.

2.1.2 정상상태 특성

조속기는 정상상태에서 미소 주파수 변화에도 응동한다. 그러나 조속기의 속도조정의 특성상 정상상태 편차가 항상 발생한다[2]. 이는 대기 계통에서 Isochronous 운전 발전기가 없는 경우 피할 수 없는 특성이다. 따라서 조속기만에 의한 주파수 제어는 항상 주파수 정상상태 편차의 범위가 크게 마련이다. 이러한 정상상태 편차를 항상 허용하는 속도조정의 특성은 정상상태에서 AGC를 사용함으로써 보완될 수 있다. 북미에서는 AGC의 이러한 기능을 주파수 조정(Regulation)으로 분류하여 활용하고 있다.

2.2 AGC의 주파수 제어 기능 요구조건

북미의 전력계통 특성은 대규모 계통이 서로 연계되어 있기 때문에, 발전기 탈락과 같은 대규모 상정사고의 경우에도 주파수가 크게 하락하는 경우가 없다. 따라서 조속기는 정상상태의 주파수 편차를 제어하며, AGC는 연계 계통의 조류를 제어하거나 정상상태에서 조속기의 백업으로 주파수를 제어하는 기능을 가지고 있다. 그러나 우리나라와 같은 단독계통에서는 AGC 기능의 요구 조건이 달라져야 한다. 즉, 정상상태에서의 주파수 편차 저감 제어 기능과 함께 상정사고 발생 시 주파수회복 유지기능이 주어져야 한다는 것이다. 즉, 우리나라 계통에서 AGC의 기능은 적어도 다음 두 가지가 있어야 한다.

1. 정상상태에서의 주파수 편차 저감 제어
2. 조속기에 의한 주파수 하락 방지 후 주파수회복 유지기능

2.2.1 정상상태에서의 주파수 편차 저감 제어

조속기의 주파수 제어 특성이 빠른 응답 특성과 정상상태에

- 1) 영구 England-Wales 시장에서는 일차 응답 시간을 6초, 호주 NEM에서는 10초로 정의하고 있다.

서의 주파수 편차 허용이라면, 조속기의 주파수 제어에 보완적인 AGC의 주파수 제어 특성은 느린 응답 특성과 정상상태에서의 주파수 편차 제어(Frequency Regulation)로 설명할 수 있다. 북미 계통에서 주파수제어 보조서비스를 Frequency Regulation으로 분류하여 이것만 사용하는 것도 이러한 이유 때문이다. 즉, LFC는 부하 변동에 따른 주파수 변화를 AGC에서 제어하는 기능인데, 조속기의 주파수 제어 기능과는 서로 보완적인 관계를 가져야 조속기 제어 입력과 AGC 제어 입력간의 간섭 현상(confliction)을 방지할 수 있다. 조속기와 AGC의 주파수 제어 기능이 서로 상충되지 않게 제어하는 방법 중 가장 간단한 것이 AGC의 주파수 제어 응답 속도가 조속기에 비해서 매우 느리게 설정하는 것이다. 따라서 LFC에 의한 주파수 제어는 응답 속도는 느린 반면, 조속기가 제어하지 못하는 정상상태에서의 주파수 변화의 변동 폭을 제어함으로써 주파수가 규정된 값으로 유지되도록 하는 성능을 가지게 된다.

AGC의 LFC에 의한 Frequency Regulation 목적을 달성하기 위하여 AGC 제어를 설계하는 데에는 다음과 같은 사항들을 만족하여야 한다.

1. 조속기 제어에서 허용하는 정상 상태 편차 보상의 성능을 가져야 한다.
2. 짧은 시간에 변동하는 부하(부하의 random variation)에는 응동하지 않아야 한다.
3. 조속기의 제어 신호와 간섭이 일어나지 않아야 한다.
4. EMS 시스템의 샘플 홀드(Sample and hold)의 영향을 최소화 하여야 한다.
5. 운전비용이 최소화 될 수 있도록 발전량의 변화를 발전기에 분배하여야 한다.

2.2.1.1 샘플홀드의 영향

AGC 신호는 EMS에서 2초 마다 전송되는 신호이기 때문에 샘플홀드에 의한 비선형성이 제어 성능에 영향을 미치지 않아야 한다. 이와 같이 샘플홀드의 영향을 모델링 오차로 모델링한 경우 강인제어기(robust controller)를 설계하면 그 결과는 제어기에 저역 필터(Low Pass Filter)의 시정수를 크게 설계하는 것과 비슷한 결과를 보인다. 그림 2와 그림 3은 조속기의 시정수를 0.4sec로 설정한 후 정상 상태에서 LPF의 시정수와 샘플홀드의 관계를 Bode 선도로 나타난 것이다. 실선은 샘플홀드가 없는 경우 연속적으로 제어를 할 때의 보드 선도이며, 점선은 샘플홀드가 존재하는 경우의 보드 선도를 나타낸다. 샘플홀드의 영향이 최소화 된다는 것은 점선과 실선이 유사해서 입출력 간의 전달함수에 오차가 나타나지 않는다는 뜻이므로 LPF의 시정수가 최소한 5sec 이상 일 때 샘플홀드의 영향이 적어짐 알 수 있다. 결론적으로 샘플홀드에 의한 AGC의 제어기의 영향을 최소화하기 위해서는 저역 필터의 적용에 의해 제어기의 응답속도를 느리게 해야 할 필

요가 있다. 또한 실제 시스템에서 존재하는 외란을 고려할 때 시정수는 5sec보다 매우 큰 값을 가져야지만 샘플홀드의 영향을 줄일 수 있다.

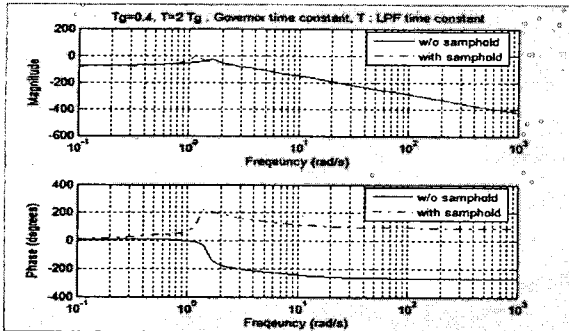


그림 2 Bode 선도(LPF의 시정수 2sec)
Fig. 2 Bode plot(LPF time constant 2Sec)

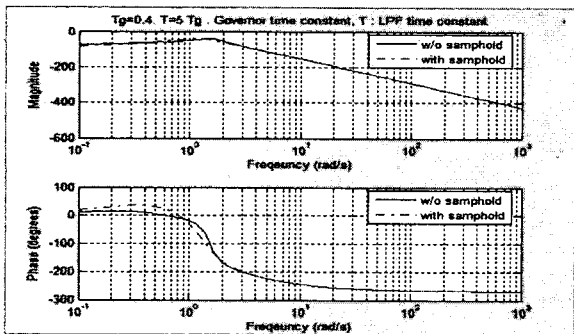


그림 3 Bode 선도(LPF의 시정수 5sec)
Fig. 3 Bode plot(LPF time constant 5sec)

2.2.1.2 Low pass filter 모델링

부하의 random variation에 대해서 제어가 응답하는 것을 방지함과 동시에 조속기 제어신호와 AGC 신호가 간섭하여 서로 상충되는 것을 방지하고, 주파수 센서의 노이즈를 제거하며, 샘플홀드의 영향을 최소화하기 위해서 저역 필터를 사용하게 된다.

그림 4는 고전적 발전기 모델에 AGC를 추가하였을 때 시스템의 극점(pole)의 위치를 분석한 것이다. 어두운 부분은 극점이 우반 평면에 존재함을 나타낸다. 예를 들어 조속기의 시정수가 0.4sec 일 때 LPF의 시정수가 1.1sec이라면 우반 평면에 극점이 위치하기 때문에 시스템은 불안정하게 된다.

정상상태에서 부하의 random variation을 화이트 노이즈(white noise)로 모델링하고 조속기의 시정수를 0.4sec, LPF의 시정수를 1.1sec로 시뮬레이션 해본 결과는 그림 5와 같다. 그림 6은 조속기의 시정수가 0.4sec 일 때 LPF의 시정수를 5sec로 설정하고(그림 4에서 어두운 부분 밖) 같은 조건으로 시뮬레이션을 한 결과이다.

위의 결과들을 살펴보면 조속기의 시정수를 보통 0.3sec에서 3sec사이로 설정할 때 LPF의 시정수는 조속기의 시정수 값에 적어도 약 5배~10배 이상의 값으로 설정해야만 시스템이 안정함을 알 수 있다. 이는 단일 발전기의 경우에 해당하며, 수백기의 발전기가 연계되어 있는 경우에는 저역필터의 시정

수를 더욱 더 크게 해야 안정적인 제어 효과를 기대할 수 있다. 실제로 저역필터의 시정수는 AGC에 의한 LFC 제어의 밸브 운동을 최소화하기 위하여서 훨씬 크게 설계할 수도 있다.

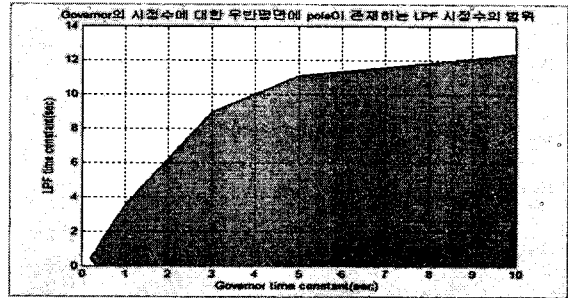


그림 4 우반평면에 pole이 존재하는 LPF 시정수의 범위
Fig. 4 Range of LPF time constant to make right half-plane pole

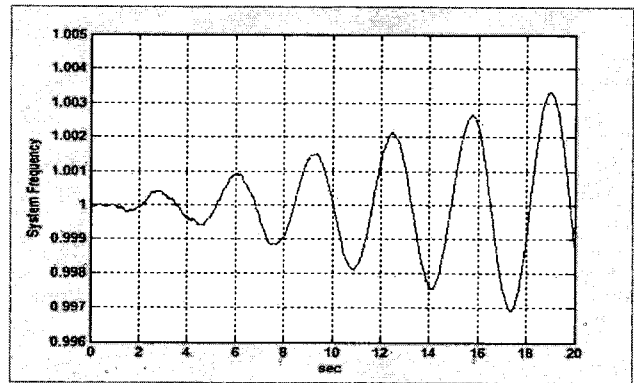


그림 5 주파수 변화
Fig. 5 Frequency deviation

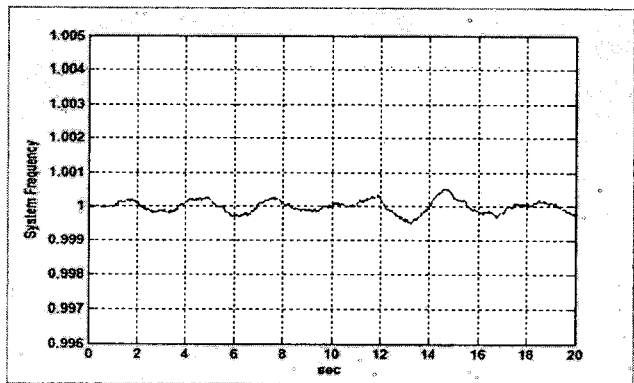


그림 6 주파수 변화
Fig. 6 Frequency deviation

2.2.2 단독계통에서 AGC의 주파수 회복(FRSC) 제어 기법

북미와 같은 대규모 연계 계통에서는 발전기 탈락과 같은 대규모 상정사고의 경우에도 주파수가 크게 하락하면서 변동(swing)하는 경우가 없기 때문에 조속기에 의한 빠른 주파수 제어와 AGC의 LFC만을 이용한 정상상태 주파수 제어 성능

만으로도 만족할 만한 주파수 제어 성능을 발휘할 수 있다. 하지만 우리나라와 같은 단독 계통에서는 대형 발전기 탈락과 같은 상정사고 발생 시, 주파수 하락폭이 크기 때문에 조속기 일차 응답 이후 주파수 회복을 지속시키기 위한 발전기 출력 제어기능이 부가되어야만 만족스러운 주파수 제어 성능을 기대할 수 있다. 또한 상정 사고 시 주파수의 변동폭이 크기 때문에 정상 상태에서의 주파수 조정을 위한 LFC의 B 계수를 과도 상태에서 똑같이 적용하면, 빠른 출력에 의한 주파수 하락 방지보다는 오히려 오버슈트나 오실레이션이 발생할 가능성이 높다. 그러므로 단독 계통에서 일어나는 상정사고에 대한 LFC의 제어는 과도 상태를 고려하여 B 계수를 조정해 사용할 필요가 있다. 본 논문에서는 과도 상태 편차계수(transient bias factor, tf)를 제시, 이용하여 그 값을 조절하였다.

60초 이후 보일러 추종이나 터빈 추종 제어 설비가 없는 기력 발전기들의 출력이 감소하게 되면, 주파수 회복을 유지하고 정상 상태로 복귀하기 위한 발전기는 수력이나 양수 발전기, 그리고 보일러 추종이나 터빈 추종 발전기로 한정되게 되며, 이러한 발전기들에 의한 주파수 제어의 새로운 전략이 필요하게 된다. 이 기능은 발전기출력의 지령값(load reference)을 제어함으로써 얻을 수 있다. 이때의 발전기 출력은 AGC의 LFC 기능으로는 응답 특성이 따라가지 못하기 때문에 LFC와 다른 AGC의 주파수 제어 기능이 필요하게 된다. 본 논문에서는 AGC의 이러한 기능을 주파수 회복유지 제어(Frequency Recovery Sustenance Control)로 정의하고 FRSC 제어기의 제어 흐름도를 제안한다.

2.3 Frequency Recovery Sustenance Control(FRSC) 알고리즘

그림 7은 본 논문에서 제안하는 EMS의 AGC 제어 개념을 나타낸 것이다.

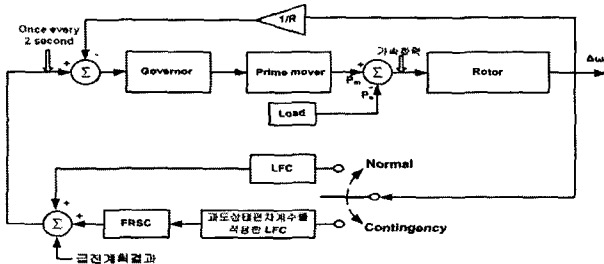


그림 7 EMS의 AGC 제어 개념
Fig. 7 Concept of AGC control in the EMS system

정상상태에서의 주파수 편차 저감 제어는 LFC가 담당하고, 상정사고 후 조속기에 의한 주파수 하락 방지 후 주파수회복 유지기능은 FRSC가 담당하게 된다. 상정사고 발생 시, 조속기에 의한 주파수의 하락 방지에 기여하는 발전기들을 일차 응답 발전기로 정의하고 주파수가 하락을 멈추고 회복하는 단계(일차 정상상태)에서 AGC에 의해 주파수회복 유지제어에 참여하는 발전기(FRSC 참여발전기)를 이차응답 발전기로 정의하였다. 따라서 이차응답 발전기의 출력 변화는 LFC에 의한 발전기의 출력변화에 비교하여 상당히 크기 때문에 이

차응답 발전기는 응답이 빠른 발전기를 미리 지정하여 예비력을 확보하고 운전할 필요가 있다.

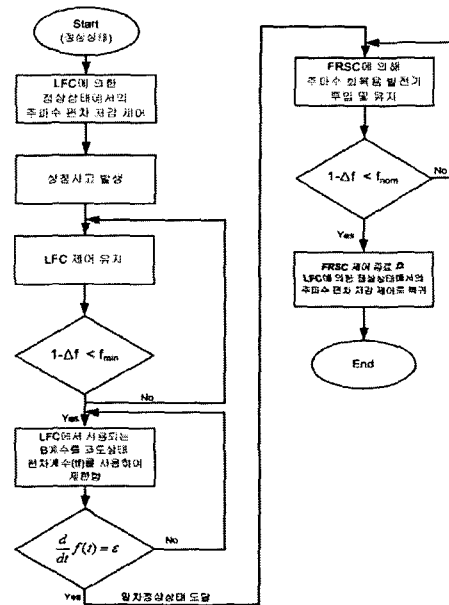


그림 8 FRSC 알고리즘
Fig. 8 FRSC algorithm

본 알고리즘은 정상상태에서 시작한다고 가정하였다. 정상 상태에서의 주파수 편차 저감 제어는 LFC가 담당한다. 상정 사고 발생 후 주파수가 기준 최저값(f_{min}) 이하로 하락하면 tf에 의해 제한된 B 계수를 사용한 LFC제어를 시작한다. 그 이유는 2.2.2에서 말한 바와 같이 과도 상태를 고려해야 되기 때문이다. 단독 계통에서의 상정사고는 주파수 변동폭이 크기 때문에 tf는 주파수 편차 저감을 위해 이용되는 LFC가 과도 상태에 그대로 적용할 경우 발생할 수 있는 주파수의 오버슈트나 오실레이션을 방지하는 역할을 한다. 일차응답 발전기에 의해 주파수 하락이 멈춘 후 일차 정상상태에 도달하면 주파수 유지 회복을 위해 이차응답 발전기가 투입되어 주파수를 유지 회복하기 시작한다. 주파수가 기준값(f_{nom}) 이상이 되면, tf를 사용하지 않은 LFC 제어로 복귀하면서 FRSC 알고리즘은 종료된다. FRSC 알고리즘을 사용함으로써 과도 상태와 주파수 회복에서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 사례연구를 통해 알 수 있다.

2.4 AGC 제어기의 설계

본 논문에서 제안하는 AGC 제어기는 P제어기(proportional plus controller)와 디지털 저역필터(digital lowpass-filter)를 이용한다. 각 발전기에 송출되는 AGC 신호의 계산식은 다음과 같다.

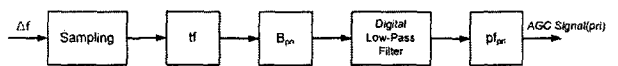


그림 9 일차응답 발전기의 AGC 제어기
Fig. 9 AGC controller for primary generator

2) 우리나라에서는 60±0.2[Hz]를 기준으로 하고 있다[3].

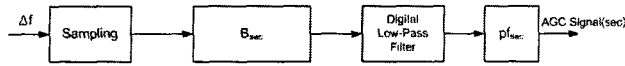


그림 10 이차응답 발전기의 AGC 제어기
Fig. 10 AGC controller for secondary generator

$$AGC_{i-pri} = (tf \times 10B_{pri} \times pf_{i-pri}) \frac{\Delta f}{T_{f_{pri}}s+1} \quad (1)$$

$$AGC_{i-sec} = (10B_{sec} \times pf_{i-sec}) \frac{\Delta f}{T_{f_{sec}}s+1} \quad (2)$$

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (3)$$

$$B_{pri} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} + D \quad (4)$$

$$B_{sec} = (1-tf) \times B_{pri} \quad (5)$$

여기서,

T : sampling time [sec]

i : 발전기 index

n : 발전기 총 대수

R : 발전기 속도조정을

D : 시스템 댐핑

AGC_{i-pri} : 일차응답 i번째 발전기의 AGC 신호

AGC_{i-sec} : 이차응답 i번째 발전기의 AGC 신호

tf : AGC 신호의 과도상태 편차계수(transient bias factor)

B_{pri} : 일차응답 주파수 편차계수 [MW/0.1Hz]

B_{sec} : 이차응답 주파수 편차계수 [MW/0.1Hz]

pf_{i-pri} : 일차응답 i번째 발전기의 참여계수(participation factor)

pf_{i-sec} : 이차응답 i번째 발전기의 참여계수(participation factor)

T_{f_{pri}} : 일차응답 필터의 시정수 [sec]

T_{f_{sec}} : 이차응답 필터의 시정수 [sec]

본 논문에서 제안한 FRSC 알고리즘에서는 과도 상태에서 발생할 수 있는 주파수 오버슈트나 오실레이션의 문제점과 주파수 회복 유지 기능을 보완하기 위해 B계수와 지역 필터의 시정수를 일차와 이차 응답에 각각 다른 값을 적용시켰다. 일차 응답에 적용되는 필터의 시정수는 LFC의 시정수와 같은 정도로 크게 하지만, B계수는 LFC의 경우보다 작게 조절하여 오버슈트나 오실레이션을 방지하도록 하여야 한다. 하지만 그림 1에서 볼 수 있듯이 일차 정상상태 편차는 일차 응답 B계수에 의해서 결정되므로 과도 상태를 고려하여 그 값을 크게 제한한다면 일차 정상상태 편차가 커지게 되어 빠른 주파수 회복을 기대하기 어렵다. 그러므로 오버슈트나 오실레이션이 일어나지 않는 범위에서 일차 응답 B계수의 값을 조절하여 일차 정상상태 편차를 줄여줄 필요가 있다. 이차응답 B계수와 필터의 시정수는 일차 정상 상태에서 적용되므로 B계수 값을 LFC와 같이 적용할 수 있으며 빠른 주파수 회복을 위하여 작은 값의 시정수를 사용할 수 있다. 계산된 총 AGC신호는 경제성과 발전기 특성을 고려하여 pf를 통해 각 발전기에 분배된다. (식3)은 디지털 지역 필터를 사용하기 위한 Bilinear transformation을 나타낸다[4].

3. 사례연구

그림 11은 사례연구에 사용한 10모선 계통이며 표 1,2,3은 계통 및 발전기와 여자기의 데이터이다. 모선 #1과 #7, 모선 #2와 #8, 모선 #3과 #9 그리고 모선 #4와 #10은 본래 부하와 발전기가 같이 있는 하나의 모선이었으나 외부 리액턴스(external reactance)를 사용해서 모선을 분리하였다. 그 이유는 실제 계통에서 하나의 모선에 부하와 발전기가 같이 있는 경우에 그 모선에 부하가 변동하면 계통의 여러 발전기들이 변동량을 분담하지만 시뮬레이션에서 부하와 발전기를 하나의 모선으로 처리를 하면 그 모선의 부하 변동량은 모선에 연결된 발전기만 분담하기 때문이다.

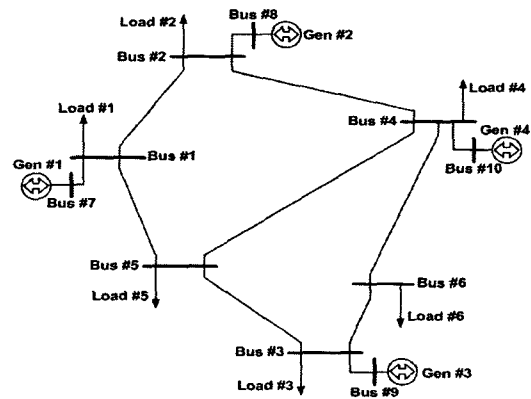


그림 11 사례연구 계통
Fig. 11 Case study system

시뮬레이션에 사용된 동기기는 q축의 χ_q 와 d축의 χ_d 가 생략된 2개의 축을 가진 원통형 회전자(cylindrical rotor) 기기이며[5][6], 여자 시스템(excitation system)은 IEEE type1을 사용하였다[7]. 동기기와 여자기에 사용된 파라미터들은 LFC만의 제어방식과 본 논문에서 제안한 알고리즘의 비교를 위하여 각 발전기에 동일하게 적용 하였다.

표 1 사례연구 선로 데이터

Table 1 Case study line data

Bus		R (p.u)	X (p.u)	B/2 (p.u)
From	to			
1	2	0.04	0.12	0.03
1	5	0.02	0.06	0.06
2	4	0.04	0.12	0.03
3	5	0.03	0.15	0.05
3	6	0.03	0.15	0.05
5	4	0.06	0.18	0.04
6	4	0.02	0.06	0.06
1	7	0.0	0.02	0.0
2	8	0.0	0.02	0.0
3	9	0.0	0.02	0.0
4	10	0.0	0.02	0.0

표 2 사례연구 모선 데이터

Table 2 Case study bus data

Bus no	Bus type	Voltage Mag.(p.u)	Angle Degree	Load		Generator			
				MW	Mvar	MW	Mvar	Droop	type
1	0	-	-	70.0	20.0	-	-	-	-
2	0	-	-	80.0	25.0	-	-	-	-
3	0	-	-	100.0	20.0	-	-	-	-
4	0	-	-	75.0	10.0	-	-	-	-
5	0	-	-	85.0	22.0	-	-	-	-
6	0	-	-	50.0	12.0	-	-	-	-
7	1	1.1	0.0	-	-	-	-	0.060	1
8	2	1.1	-	-	-	180.0	-	0.060	2
9	2	1.1	-	-	-	50.0	-	0.060	1
10	2	1.1	-	-	-	50.0	-	0.060	2

Bus type - 0:Load, 1:Swing, 2:Generator Generator type - 1:일차 발전기, 2:이차 발전기

표 3 사례연구 발전기 및 여자기 데이터

Table 3 Case study generator and exciter data

x_d	1.790	T_E	0.460
x_q	1.568	K_E	-0.0465
τ_j	10.00	T_F	1.000
x'_d	0.355	K_F	0.100
x'_q	0.570	T_A	0.060
τ'_{do}	7.900	SE[E_{FD}]	0.330
τ'_{qo}	0.410	K_A	46.000
M	10.000	T_B	0.000
D	2.000	T_C	0.000
VR_max	1.000	E_{FD}	3.100
VR_min	-0.900	K_E	1.000

그림 12,13은 Load #5와 Load #6이 각각 85MW에서 92MW로 50MW에서 60MW로 부하가 급변하였을 때를 정상사고로 설정하여 주파수의 변화를 각기 다른 제어 방식으로 했을 때 나타난 시뮬레이션한 결과이다. 그림 14에서 17은 본 논문에서 제안하는 FRSC알고리즘을 사용했을 때 발전기들의 출력 변화를 나타낸다. 그림 12에서 알 수 있듯이 LFC만의 제어방식(case 1)은 정상상태 편차를 보상해 주고 있으나 과도 상태에서 주파수는 약 0.41%의 오버슈트를 보여주고 있다. 이는 단일 계통에서 상정사고가 일어났을 경우, 주파수 변동폭이 크기 때문에 나타날 수 있는 경우이다. 즉, 25초에서 발전기에 입력되는 EMS의 지령값은 샘플홀드에 23초에 샘플링된 계통 주파수를 이용하여 계산한 값이기 때문이다. 즉, AGC 제어기의 특성을 충분히 고려하지 않고 B계수와 저역 필터의 시정수를 설정하였기 때문에 조속기와 AGC의 제어가 간섭을 일으킨 것이다. tf를 0.5로 설정한 case 5 역시 약 0.1% 오버슈트를 보여준다.

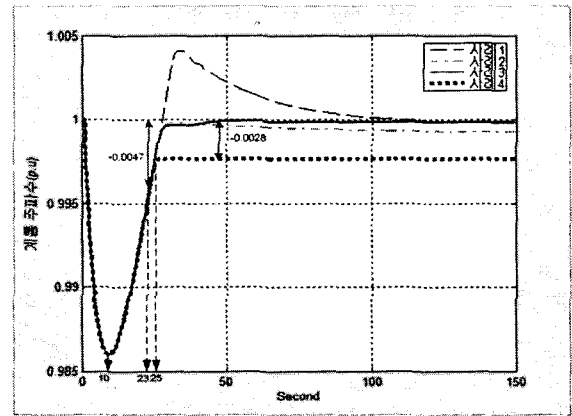


그림 12 시뮬레이션 결과(주파수 변화)

Fig. 12 Simulation results (frequency deviation)

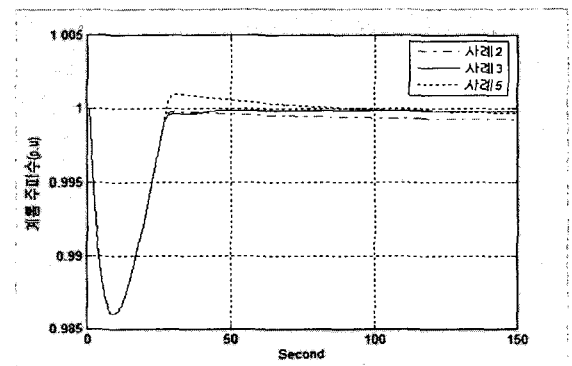


그림 13 시뮬레이션 결과(주파수 변화)

Fig. 13 Simulation results (frequency deviation)

Case 2는 case 1,5에서 나타난 조속기와 AGC의 간섭을 고려하여 tf를 0.2로 제한하여 시뮬레이션한 결과이다. case 1과는 달리 오버슈트는 없지만 정상상태에서 주파수 편차를 보상하지 못하고 약 -0.0007p.u의 편차를 보여준다. 단순히 B계수의 조절에 의한 피드백 제어는 시스템의 안정성과 주파수 편차 보상의 기능, 이 두 가지를 모두 만족시킬 수 없음

case 1,2,5를 통해 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 FRSC 알고리즘을 사용한 case 3의 경우 case 1의 문제점인 간섭이 나타나지 않았으며, 2차 발전기용 AGC의 저역 필터 시정수를 일차 시정수보다 5배 빠르게 설정함으로써 주파수를 빠르게 회복시켜 주파수 편차가 약 -0.00013p.u 으로 나타나 case 2에 비하여 81.43%의 성능 향상을 보여주었다. 그림 16,17에서 주파수 회복유지를 위해 약 36초에서 FRSC 참여 발전기의 출력이 증가함을 알 수 있다.

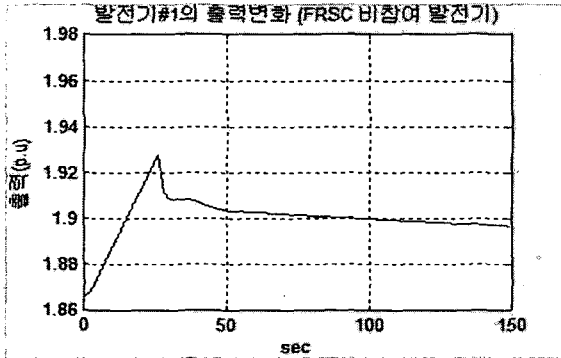


그림 14 시뮬레이션 결과(발전기#1 출력)
Fig. 14 Simulation results (generator#1 output)

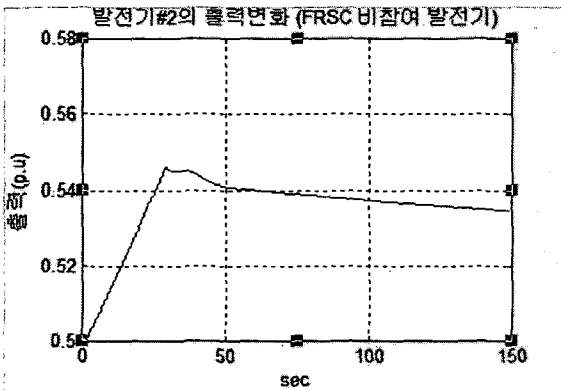


그림 15 시뮬레이션 결과(발전기#2 출력)
Fig. 15 Simulation results (generator#2 output)

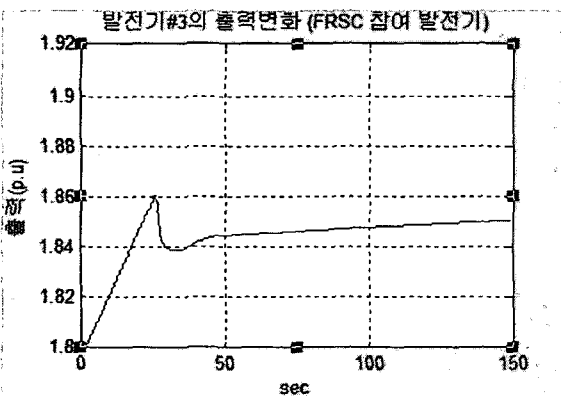


그림 16 시뮬레이션 결과(발전기#3 출력)
Fig. 16 Simulation results (generator#3 output)

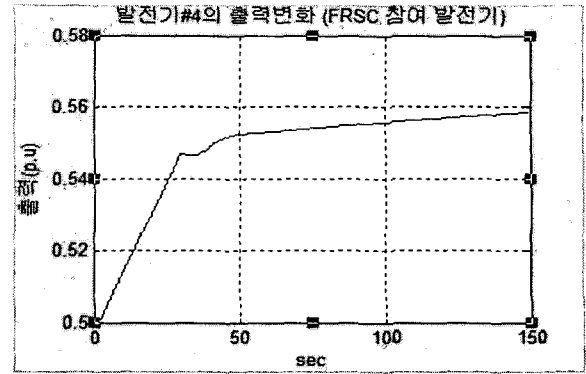


그림 17 시뮬레이션 결과(발전기#4 출력)
Fig. 17 Simulation results (generator#4 output)

표 4 사례연구 구분

Table 4 case study classifications

구분	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
tf	-	0.2	0.3	-	0.5
$T_{pri}(\text{sec})$	300	300	300	-	300
$T_{sec}(\text{sec})$	-	-	60	-	-

case 1 : LFC 제어방식 사용

case 2 : LFC 제어방식에 B계수를 tf로 제한하여 사용

case 3 : 본 논문에서 제안한 알고리즘 사용

case 4 : 조속기만을 사용

case 5 : LFC 제어방식에 B계수를 tf로 제한하여 사용

4. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 우리나라와 같은 단독 계통에서의 발전기 탈락이나 부하의 급변과 같은 상정사고 발생 시 주파수 제어에 문제가 되는 단독계통에서 조속기와 AGC의 주파수 제어에 대한 역할 분담에 대해서 고찰하고, 정상상태에서의 주파수 하락 방지 후 주파수회복 유지 기능을 위한 FRSC를 제안하였다. 단독 계통에서 상정사고 발생 시, AGC의 LFC만에 의한 제어는 시스템의 안정성과 주파수 편차 보상의 기능, 이 두 가지를 모두 만족시킬 수 없음을 알 수 있었다. 이런 문제점을 해결하기 위해 제안한 FRSC 알고리즘에서는 일차응답의 과도 상태에서 나타날 수 있는 오버슈트나 오실레이션을 피하기 위해 과도 상태 편차계수(tf)에 의하여 제한된 B계수와 큰 시정수를 가지는 저역 필터를 이용한 AGC의 LFC를 사용하였다. 그 결과 과도 상태에서의 오버슈트나 오실레이션의 발생을 억제했을 뿐 아니라, 조속기에 의한 주파수 하락 방지 후 나타나는 일차 정상상태의 편차를 조금 더 줄여줌으로서 빠른 주파수 회복을 기대할 수 있다. 이차응답은 주파수 변동이 작은 일차 정상상태부터 시작되기 때문에 작은 시정수를 가지는 저역 필터와 제한하지 않은 B계수를 사용함으로써 만족할 만한 빠른 주파수 유지 회복기능을 얻을 수 있었다.

각기 다른 상정사고에 대해서 FRSC 알고리즘을 적용하기

위해서는 주파수 편차를 보상해주는 B계수의 비선형성에 [8],[9] 대한 추가 연구가 필요하며, 정상상태 주파수 편차 제어 개선을 위해 적분 제어기의 도입에 대한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

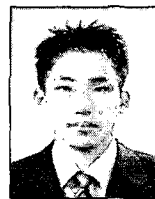
- [1] 전영환, "우리나라의 보조서비스 구현을 위한 기술적 검토", 기초전력연구원, 2002, pp.3-4
- [2] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation and Control", John Wiley & Sons, Inc. 1996, pp.336-340
- [3] 한국전력거래소 "전력시장운영규칙" 별표 3.전력계통 운영기준 13.2 p.146
- [4] Charles L. Phillops, "Digital Control System", Prentice Hall 1990, pp.225-226
- [5] Paul M. Anderson, "Power System Control and Stability", IEEE Press 1977, pp.138-143
- [6] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall 1998, pp.273-278
- [7] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421.5-1992
- [8] T. Kennedy, S. M. Hoyt and C. F. Abell, "Variable, Non-Linear Tie-Line Frequency Bias for Interconnected Systems Controls", IEEE TPS, August 1988, pp1244-1253.
- [9] N. Jaleeli, L. S. VanSlyck, D. N. Ewart, L. H. Fink, "Understand Automatic Generation Control", IEEE TPS, August 1992, pp1106-1112

저 자 소 개



최 승 호 (崔承鎬)

1977년 12월 9일생. 2003년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기정보제어공학과 석사과정.
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : winho.choi@gmail.com



황 교 익 (黃敎益)

1978년 11월 5일생. 2004년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기정보제어공학과 석사과정.
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : kyoikh@gmail.com



전 영 환 (全瑩煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985 - 1994년 한국전기연구소 근무. 1997년 동경대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년 - 1998년 동경대 조수 역임. 1998 - 2002년 한국전기연구원 그룹장. 2002년 - 현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 02-320-1620, Fax : 02-320-1110
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr