

3상 교류 시스템의 불평형 및 고조파가 dq 변환에 미치는 영향 분석 및 마이크로컨트롤러 기반 시뮬레이터 개발

김시경*, 박현상*, 이일규*, 서봉수**, 강대수***
공주대학교 공과대학
e-mail:skim@kongju.ac.kr

Development of a Microcontroller-Based Simulator and Analysis of Unbalance and Harmonics on dq Transformation in Three-Phase AC Systems

*Div. of Electrical, Electronics and Control Engineering, Kongju National University, vandammm@kongju.ac.kr, **Dept. of Smart Information Technology Engineering, Kongju National University, ***Div. of Information and Communication Engineering, Kongju National University

요 약

3상 시스템 불평형과 고조파는 현대 전력 시스템에서 전력 품질 저하의 주요 원인으로, 전압 파형을 왜곡하고 전력 장비의 성능에 영향을 끼친다. 이러한 현상은 3상 교류 시스템에 연계된 모터, 인버터 및 기타 전력 장치의 효율성과 신뢰성을 크게 저하시킬 수 있다. 본 연구는 3상 전력 제어 시스템에서 불평형과 고조파의 영향을 분석하고, 교류 시스템에 일반적으로 널리 사용되는 dq 변환에 대한 영향을 감지하고 평가할 수 있는 마이크로컨트롤러 기반 시뮬레이터를 개발한다. 제안한 시뮬레이터는 불평형과 고조파를 탐지하고 분석할 수 있어 3상 교류 dq 기반 제어 시스템의 문제 해결 및 전력 품질 분석의 신뢰성 향상에 기여할 수 있다.

1. 서론

다양한 전력 반도체 사용의 증가로 인하여, 현대 전력 시스템의 불평형과 고조파 발생은 전력 품질을 유지하는 데 있어 심각한 도전 과제이며, 이는 전압 파형을 왜곡하고 전기 장비의 성능을 저하 시킨다[1]. 특히 3상 교류 평형 시스템은 이러한 문제에 취약하여 모터, 인버터 및 기타 장치의 작동 성능을 저하 시킬 수 있으며, 이로 인해 비효율성이 발생하고 전체 시스템의 신뢰성이 감소한다[2]. dq 변환은 이러한 3상 전력 및 부하 시스템에 널리 사용되는 제어 방법으로, 3상 불평형 및 고조파에 특히 민감하다[1,2]. 불평형 및 고조파가 발생하면 dq 좌표계에서 원하지 않는 진동 및 교란을 유발하여 시스템 제어와 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다[3]. 본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 3상 시스템에서 dq 변환에 대한 불평형과 고조파의 영향을 분석 한다.
- 전력 품질 문제를 탐지하고 평가하는 마이크로컨트롤러 기반 시뮬레이터를 개발한다.
- 불평형과 고조파가 존재할 때 dq 변환 제어 시스템 성능을 개선하기 위한 기법을 제안한다.

2. 불평형 및 고조파로 인한 전압 파형 왜곡

이상적인 3상 시스템은 상 전압의 크기가 동일하고, 각 상 사이에 120° 위상 차이를 유지 한다. 그러나 계통에 연계된 3상 부하의 불평형 및 계통 기생 리액턴스로 인해 3상 공급 전압의 크기와 위상이 달라 지고 전압 파형 왜곡이 발생하는 문제가 발생한다. 이러한 불평형은 상 전압 간의 차이를 특징을 가지며, 이로 인해 중성선의 전류 증가, 장비 과부하, 손실 증가 및 열 발생의 문제를 유발 한다.

3상 시스템에 널리 사용되는 dq 변환은 3상 전원의 전압이 동일한 실효치와 120° 위상 차이를 유지할 때 안정적으로 동작 된다. 그러나, 불평형 및 고조파 유입 상황이 발생하면 상 전압 또는 전류의 크기와 위상이 다르게 되고, 이로 인하여 3상 순시 전압 또는 전류의 dq 변환 후 d축 및 q축 값에 추가적인 직류 성분(바이어스) 나타나게 된다. 이러한 비 이상 성분은 제어 시스템에 교란을 일으켜 시스템 성능 저하를 초래한다.

2.1 3상 시스템 불평형 시스템으로 인한 d축 및 q축 값 변동

3상 전원의 불평형의 경우, d축 및 q축 성분에는 직류(DC)

값이 아닌 교류(AC) 성분이 포함될 수 있다. 이는 제어 시스템에 잡음과 진동을 도입하여 특히 모터의 속도 및 위치 제어에 부정적인 영향을 미치며, 정밀한 제어를 어렵게 만든다. 이에 대한 정량적 특성 분석을 위하여 다음과 같은 불평형 시스템을 분석하였다. 3상 평형 시스템 과 3상 불평형 시스템의 특성 분석을 위하여, 먼저 3상 평형 시스템에 대한 분석을 다음과 같이 해석 하였다.

- 평형 3상 전압:
- $V_A=V_B=V_C=220[V]$
- 위상 각: $\theta_A=0^\circ, \theta_B=-120^\circ, \theta_C=120^\circ$
- 평형 3상 dq 전압:
- d축 성분: $V_d=220 [V]$
- q축 성분: $0[V]$

이는 d축 전압 성분이 220이고 고 q축이 0으로 일정하게 유지되는 안정적인 작동을 나타낸다.

위의 3상 평형 시스템에 10(%)의 상 부하 불균형 발생시, 상 전압 과 위상각에 불평형 발생시 분석은 다음과 같다.

- 불평형 3상 전압:
- $V_A=220[V], V_B=200[V], V_C=240[V]$
- 위상 각: $\theta_A=0^\circ, \theta_B=-115^\circ, \theta_C=125^\circ$

- 불평형 3상 dq 전압:
- d축 성분: $395.5[V]$ (3상 평형 경우보다 높음)
- q축 성분: $20[V]$ (3상 평형 경우보다 높음)

이와 같이 3상 불평형 전압으로 인하여, d축 및 q축 전압 성분의 증가를 발생하며, d축 및 q축 제어 시스템의 불안정을 초래 한다.

2.2 3상 시스템의 고조파 로 인한 d축 및 q축 값 변동

고조파는 전력 반도체 소자 기반의 비선형 부하에서 발생하며, 전압 및 전류 파형을 왜곡하는 고주파 성분을 발생 한다. 이러한 고조파는 전력 시스템의 안정성에 영향을 미치며, 변압기 및 기타 전력 장비에서 과열 및 전자기 간섭(EMI)을 유발할 수 있다. 고조파의 존재는 시스템 구성 요소에 대한 스트레스를 증가시키고 전반적인 성능을 저하시키는 문제가 있다.

또한, 이러한 고조파는 dq 변환 과정을 더욱 복잡하게 만든다. dq 변환은 동일한 주파수의 신호에 대해 작동하도록 설계 되었지만, 고조파는 여러 주파수 성분을 포함 하고 있다. 특히 5차 및 7차 고조파는 직류 성분인 d축과 q축 모두에 진동 성분을 유발 하여 제어 시스템의 안정성을 방해 한다. dq 성분

의 이러한 진동은 피드백 루프를 통해 전파되어 잘못된 제어 신호를 생성하고 전력 품질을 저하시킨다. 이에 대한 정량적 특성 분석을 위하여 다음과 같은 고조파 유입 시스템을 분석 하였다. 3상 평형 시스템과 3상 고조파 유입 시스템의 특성 분석을 위하여, 먼저 3상 평형 시스템에 대한 분석을 다음과 같이 해석 하였다.

- 5차 고조파 (300Hz)가 유입된 3상 시스템
- $V_A=V_B=V_C=220[V]$
- 위상 각: $\theta_A=0^\circ, \theta_B=-120^\circ, \theta_C=120^\circ$
- 고조파 300[Hz] 전압: $V_5=30[V]$
- 불평형 3상 dq 전압:
- d축 성분:
- q축 성분:

5차 고조파는 d축과 q축 성분 모두에 고주파 진동을 유발하여, 직류 성분만으로 제어를 수행하는 시스템의 불안정을 유발한다, 특히 반도체 비선형 부하를 기반으로 하는, 모터와 인버터 제어에서 문제점이 더욱 두드러진다.

3. 3상 불평형 전압 및 고조파 생성 마이크로컨트롤러 시뮬레이터 설계

3상 전력 시스템에서의 불평형 전압 및 고조파는 전력 품질 저하의 주요 원인 중 하나이다. 본 연구는 불평형 전압과 고조파의 영향을 분석하고, 이를 제어하기 위한 마이크로컨트롤러 기반의 시뮬레이터 설계를 하였다. 이 시뮬레이터는 시뮬레이터에 부착된 포텐시오미터를 통해 불평형 전압과 고조파의 진폭 및 종류를 조절하며, 다양한 불평형 및 고조파 3상 전압 신호를 생성하여 다양한 조건에서의 d축과 q축 성분 기반의 3상 전압 출력 및 을 시뮬레이션할 수 있다.

본 시뮬레이터는 마이크로컨트롤러를 이용하여 3상 전압 신호를 생성한다. 초기화 단계에서 DAC 편과 포텐시오미터 편을 설정하고, 타이머 및 인터럽트를 초기화한다. 메인 루프에서는 포텐시오미터로 부터의 입력을 통해 불평형 전압 및 고조파의 진폭을 조절하며, 신호 생성을 위한 계산을 수행한다. 시뮬레이터의 하드웨어 및 소프트웨어 구성은 다음과 같다.

- 하드웨어 구성
- 마이크로컨트롤러: 불평형 및 고조파 포함 3상 전압 신호를 생성하고 포텐시오미터로부터 입력을 읽기 위해 사용된다.
- 포텐시오미터: 고조파 및 불평형 전압 조절 및 고조파 주

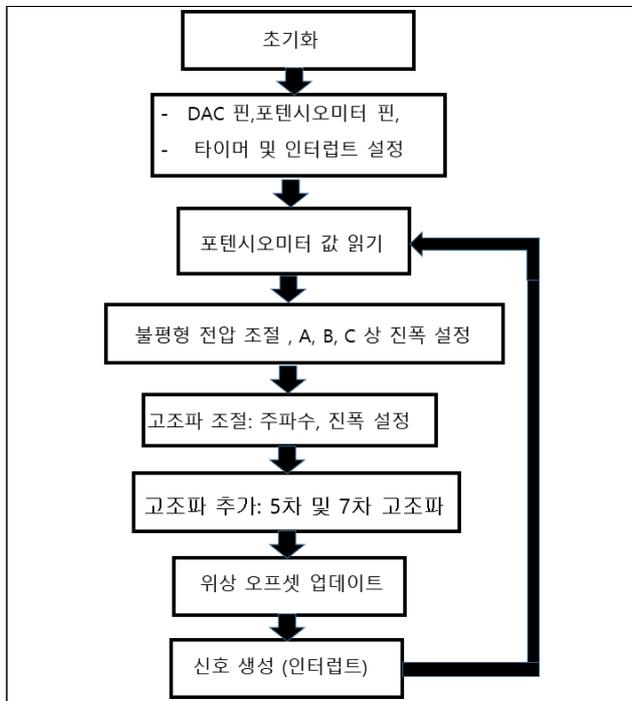
파수 및 진폭 조절에 사용된다.

- D/A 컨버터: 불평형 전압 조절 및 고조파를 포함한 3상 전압 신호를 DAC 출력하기 위한 핀이다.

- 소프트웨어 구성

- 초기화 함수: DAC 핀을 출력 모드로 설정하고, 포텐시오미터 핀을 아날로그 입력으로 설정하며, 타이머를 초기화하고 인터럽트를 발생한다.
- 메인 루프: 포텐시오미터 값 읽기, 불평형 전압 및 고조파 조절, 신호 생성 등의 작업을 반복 수행한다.

시스템의 불평형 전압과 고조파의 진폭 및 종류를 조절하며, 다양한 불평형 및 고조파 3상 전압 신호를 생성하는 과정은 그림 1의 플로우차트와 같이 구현 되었다.



[그림 1] 3상 불평형 전압 및 고조파 생성 시뮬레이터 플로우플로우 차트

4. 3상 불평형 전압 및 고조파 생성 시뮬레이터 분석

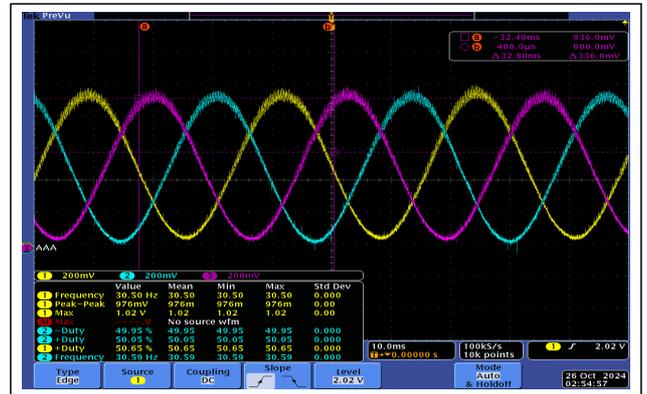
본 절에서는 마이크로컨트롤러 기반의 시뮬레이터를 활용하여 이러한 불평형 전압 및 고조파의 특성을 분석하고, 그 결과를 실험을 통해 관찰하였다. 마이크로컨트롤러는 DAC 핀과 포텐시오미터 핀을 초기화하고, 타이머 및 인터럽트를 설정하여 전압 신호 생성을 위한 기반을 마련하였다. 포텐시오미터를 통해 불평형 전압 및 고조파의 진폭과 종류를 조절할 수 있었다 실험은 두 가지 주요 파형을 생성하고 분석하는데 중점을 두었다. 첫 번째는 3상 불평형 전압 파형이며, 두

번째는 5고조파가 포함된 전압 파형이다.

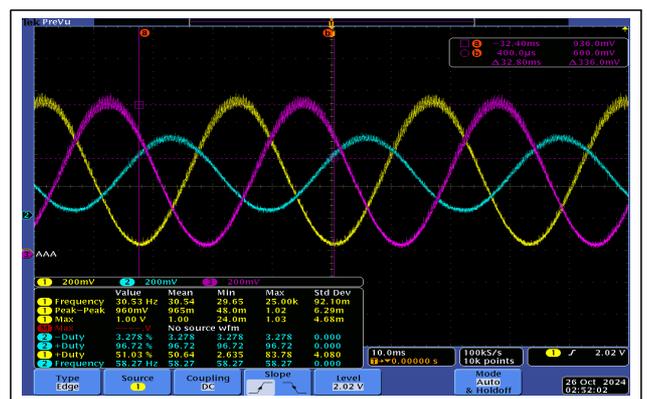
4.1 3상 불평형 전압 파형 생성

3상 불평형 전압 파형은 각 상의 전압이 서로 다르게 설정되도록 조절하였다. A상의 전압, B상의 전압 및 C상의 전압이 50[%] 불균형 편차가 있도록 설정하였다. 이를 통해 불평형 상태를 시뮬레이션하고, 오실로스코프를 이용하여 파형을 계측 하였다. 그림 2(a) 에 보여진 파형은 3상 평형 전압의 DAC 출력 파형이며, 그림 2(b) 에 보여진 파형은 계측 된 3상 불평형 전압 DAC 출력 파형으로서, 각 상의 전압이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 파형은 다음과 같은 특징을 보였다. 상 A, B, C의 전압 파형이 서로 다른 진폭을 가지며, 위상이 불균형하게 분포하였다.

이로 인해 전력 품질 저하를 유발할 수 있는 요소를 확인할 수 있었다.



[그림 2](a) 3상 평형 전압 시뮬레이터 출력 파형

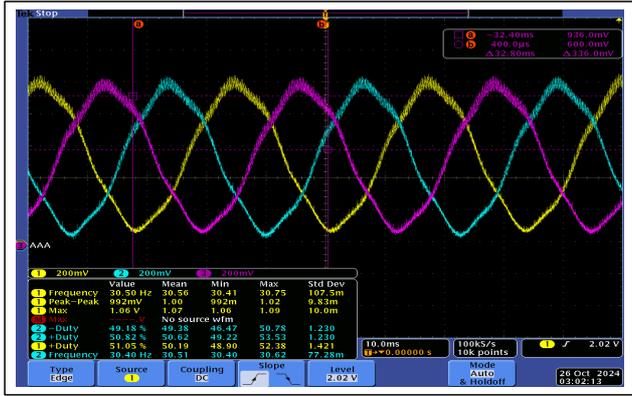


[그림 2](b) 3상 불평형 전압 시뮬레이터 출력 파형

4.2 5고조파 함유 파형 생성

고조파를 포함하는 전압 파형은 기본 주파수에 5고조파를 추가하여 생성하였다. 이 과정에서는 기본 60Hz의 전압 신호의 10[%]의 크기를 가지는 5고조파(300Hz)의 파형을 추가하

여, 고조파 성분이 포함된 전압 신호를 생성하였다. 이를 통해 기본 주파수 성분 외에 5고조파가 포함된 파형을 확인할 수 있었으며, 고조파가 포함된 파형은 원래의 정현파와 비교하여 비대칭적이고 왜곡된 형태를 나타 내었다.



[그림 3] 5고조파 함유 3상 전압 시뮬레이터 출력 파형

5. 결론

본 연구에서는 3상 교류 전원에서 불평형 및 고조파가 dq 변환에 미치는 영향을 분석하고, 마이크로컨트롤러 기반 3상 교류 전원에서 불평형 및 고조파 분석 시뮬레이터를 설계 하였다. 불평형 및 고조파는 dq 변환 후 교류 성분과 고주파 잡음을 추가하여 제어 시스템의 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 고조파 필터링, 부하 평형 조정 및 전력 품질 개선 장치가 필요하며, dq 변환 제어 시스템에서 이러한 문제를 시뮬레이션 할 수 있는 시뮬레이터가 필요 하다. 본 연구에서 제안한 마이크로컨트롤러 기반 시뮬레이터는 3상 불평형 전압 및 고조파의 영향을 실시간으로 관찰할 수 있도록 설계되었다. 포텐시오미터를 통한 조절 기능은 시뮬레이터의 유연성을 높이며, 다양한 전압 조건을 시뮬레이션하는 기능을 제공한다. 본 연구를 통해 마이크로컨트롤러 기반의 시뮬레이터가 3상 전력 시스템의 불평형 전압 및 고조파를 효과적으로 분석할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 실험 결과는 불평형 전압과 고조파가 전력 품질 저하의 주요 원인인 되는 다양한 3상 전압원을 시뮬레이션 할 수 있음을 입증하였다. 향후 연구에서는 이러한 불평형 및 고조파를 효과적으로 제어하기 인터페이스 기법 및 고전압 및 고전류 처리를 위한 기법 개발이 필요할 것이다.

참고문헌

[1] Xiong, L.; Liu, X.; Liu, Y.; Zhuo, F. , “Modeling and stability issues of voltage-source converter dominated power systems: A review”. CSEE J. Power Energy Syst., pp.1 - 18, 2020

[2] Zhu, J.; Hu, J.; Wang, S.; Wan, M. Small-Signal Modeling and Analysis of MMC Under Unbalanced Grid Conditions Based on Linear Time-Periodic (LTP) Method. IEEE Trans. Power Deliv. vol 36, pp. 205 - 214.,2021

[3] Cheng, Y.; Huang, S.-H.; Rose, J.; Pappu, V.A., “Analysis of D-Q Small-Signal Impedance of Grid-Tied Inverter“s, IEEE Transactions on Power Electronics 31(1):1-1, 2015