

하이브리드 능동전력필터의 계통 연계 위상 추종 성능 개선을 위한 위상 동기화 기법의 선정

Selection of Phase Synchronization Method to Improve Power System Connection Phase Tracking Performance of Hybrid Active Power Filter

저자 (Authors)	박현수, 이현재, 박훈양, 손진근 Hyun-soo Park, Hyun-jae Lee, Hoon-yang Park, Jin-geun Shon
출처 (Source)	전기학회논문지 P 70P(3) , 2021.9, 133-138 (6 pages) THE TRANSACTION OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS P 70P(3) , 2021.9, 133-138 (6 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10602007
APA Style	박현수, 이현재, 박훈양, 손진근 (2021). 하이브리드 능동전력필터의 계통 연계 위상 추종 성능 개선을 위한 위상 동기화 기법의 선정. 전기학회논문지 P, 70P(3), 133-138.
이용정보 (Accessed)	가천대학교 210.102.***.52 2021/12/21 17:09 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Selection of Phase Synchronization Method to Improve Power System Connection Phase Tracking Performance of Hybrid Active Power Filter

하이브리드 능동전력필터의 계통 연계 위상 추종 성능 개선을 위한
위상 동기화 기법의 선정

Hyun-soo Park · Hyun-jae Lee · Hoon-yang Park · Jin-geun Shon†

박현수* · 이현재* · 박훈양** · 손진근†

Abstract

In this paper, to improve power system connection phase tracking performance of the hybrid active power filter, compared and analyzed the robust phase synchronization method even in power sources including disturbances such as frequency and phase angle variance. Among the SOGI-based methods used to obtain a stable input voltage, the DSOGI-PLL method that tracks the phase angle of the input voltage and the DSOGI-FLL method that tracks the frequency of the system are applied to the hybrid active power filter to compare and analyzed. As a result, the phase synchronization characteristics of DSOGI-FLL method is more robust than the DSOGI-PLL method, and the current compensation characteristics is also more accurate and faster. Therefore, it is judged that the DSOGI-FLL method needs to be selected to improve the power system phase tracking performance of the hybrid active power filter.

Key Words

DSOGI-PLL, DSOGI-FLL, Hybrid Active Power Filter, Positive Sequence, Second Order Generalized Integrator

1. 서론

현대 사회는 기술 고도화 및 자동화에 따라 정류기, 충전기, 모터 드라이버 등과 같은 비선형 특성을 만들어내는 전력전자 장치들의 보급이 증가하였다. 이로 인해 기본 주파수(60Hz) 정수배의 주파수를 가진 고조파(Harmonics)의 양이 증가하고 있다. 이러한 고조파는 통신신로의 유도장애를 발생시키거나 병렬 공진으로 인한 계통의 과전압 혹은 과전류 문제를 발생시켜 전력 계통 설비들의 손상을 일으킬 수 있다[1,2].

고조파에 대한 대책 중 하나로 L과 C의 공진을 이용하여 특정 차수 고조파를 억제할 수 있는 수동전력필터(PPF : Passive Power Filter)가 있다. 이는 타 대책 대비 비교적 낮은 비용과 적은 전력 손실로 인하여 고조파 억제대책으로써 널리 사용되고 있으나 전력 시스템 임피던스에 민감하므로 전력 계통과의 공진 현상이 발생하여 고조파 전압, 전류를 반대로 증폭시킬 수 있으므로 계통 및 주변 전력장치에 손상을 줄 수 있다[3]. 반면 3상 능동전력필터(APF : Active Power Filter, 이하 APF)는 전력 시스템 임피던스에 영향을 거의 받지 않으며 모든 차

수의 고조파에 대해 억제할 수 있으며 무효전력을 보상할 수 있다는 장점을 가진다. 이는 인버터를 이용하여 비선형 부하로 인해 발생한 고조파의 역위상 파형을 발생시켜 계통의 고조파를 제거할 수 있다[4]. 그림 1에 고조파 전류를 보상할 수 있는 하이브리드 APF를 나타내었다. 하이브리드 APF는 기존 APF의 인덕터 부를 인덕터와 커패시터의 공진을 이용한 직렬의 수동전력필터로 대체함에 따라 특정 고조파 차수에 대해 더 강인하며 인버터의 특성으로 인해 기존 수동전력필터에서 발생하는 병렬공진의 문제를 해소할 수 있다[5,6]. 또한 스위칭 주파수가

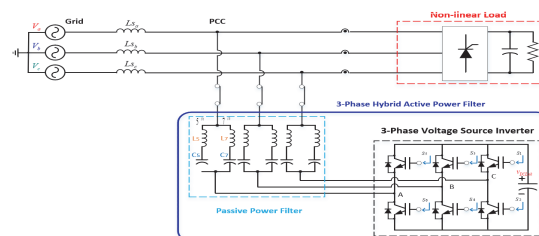


그림 1 3상 하이브리드 APF의 구성도

Fig 1 Configuration of 3-phase hybrid APF

Corresponding Author

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

E-mail: shon@gachon.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0001-8357-4437>

*Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

<https://orcid.org/0000-0001-5798-5187>

**Enertech.Co.,Ltd.

<https://orcid.org/0000-0001-8357-4437>

Received : Jul. 29, 2021 Revised : Aug. 26, 2021 Accepted : Aug. 29, 2021

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고조파보다 높은 주파수를 가짐에 따라 인덕터는 스위칭 리플을 필터링하며, 계통의 기본파 성분은 수동전력필터 커패시터의 임피던스에 따라 필터링되므로 하이브리드 APF는 기존 APF보다 커패시터 용량을 감소시킬 수 있다[7].

그러나 전력 계통의 고조파를 순시적으로 보상하는 APF가 3상 전력 계통 전압의 위상과 동기화되지 않을 경우 왜형파를 발생시켜 반대로 계통을 왜곡시키거나 원하지 않는 무효전력이 공급될 수 있다. 따라서 APF를 계통과 연결할 경우 PCC지점에서 전력 계통 전압과의 위상을 동기화시키는 것은 매우 중요하다. 하지만 실제 전력 계통은 노이즈와 같은 외란을 가지고 있으며 불평형 또는 주파수의 변동이 발생하는 비이상적인 특성을 가지고 있다[8]. 따라서 APF는 비이상적인 조건의 계통에서도 계통 전압의 위상을 정확하고 빠르게 추종할 필요가 있다.

이에 따라 본 논문은 기존 APF에서 수동전력필터가 추가된 하이브리드 APF의 전력 계통 위상 추종 성능을 개선하기 위해 계통의 주파수 변동 및 위상 변동에서의 위상 동기화 기법들의 특성을 비교 분석을 한다. 비이상적인 전력 계통에서도 안정적인 입력 전압을 얻기 위해서는 정상분 전압을 추출하는 기법을 사용할 수 있으며 전력 계통에서 정상분 전압을 얻기 위해서는 입력과 90° 위상차를 갖는 SOGI(Second Order Generalized Integrator)를 사용하여 구현할 수 있다. 이를 연산 속도 향상을 위해 정지좌표계의 α , β 축에서 사용한 것을 DSOGI(Double Second Order Generalized Integrator)라고 한다. 이를 이용한 위상 동기화 기법 중 DSOGI-PLL(Phase Locked Loop)과 DSOGI-FLL(Frequency Locked Loop)를 하이브리드 APF에 적용하여 계통의 주파수 및 위상 변동에서의 특성들을 모의실험을 통해 비교 분석하여 강인한 위상 동기화 기법을 선정하였다.

2. DSOGI를 이용한 위상 동기화 기법들의 분석

2.1 안정적인 위상 동기화를 위한 계통에서의 정상분 추출 방안 및 분석

시스템의 안정적인 동작을 위해 비이상적인 3상의 전력 계통에서도 안정적으로 위상을 동기화하기 위한 기법이 요구된다. 불안정한 전력 계통의 3상 전압을 제어기의 입력으로 사용하여 위상각을 검출할 경우 제어기의 전압, 전류 지령치에 고조파성분이 포함되어 시스템이 불안정하게 된다. 따라서 비이상적인 조건에서도 안정적인 위상 동기화를 위해 상전압과 전압 벡터 회전 방향이 동일하며 각 위상차 또한 동일한 평형 3상의 정상분 전압을 얻기 위한 정상분 추출 기법이 필요하다. 전력 계통이 각주파수 ω 를 가진 3상 평형 전압일 경우 각 상의 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다

$$e_a = E \sin \omega t \quad (1)$$

$$e_b = E \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2)$$

$$e_c = E \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3)$$

이 때 E는 상전압의 첨두치를 의미한다.

이를 이용한 대표적인 정상분 추출에 대한 식을 식 (4)에 나타내었다.

$$e_{abc}^+ = [e_a^+, e_b^+, e_c^+]^T = [T_+] e_{abc} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} e_{pa} \\ e_{pb} \\ e_{pc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} e_a - \frac{1}{2\sqrt{3}j} (e_b - e_c) \\ -(e_{pa} + e_{pb}) \\ \frac{1}{2} e_c \end{bmatrix}$$

이러한 정상분 추출을 계산하기 위해 SOGI를 사용하였으며, 시스템 속도 향상을 위해 abc 3상 전압을 Clarke Transform하여 정지좌표계 상의 α , β 축에서 두 개의 SOGI를 사용한 DSOGI 기법을 사용하였다. 따라서 이를 나타내면 식 (5)와 같다.

$$e_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] e_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] [T_{\alpha\beta}]^{-1} e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-q \\ q & 1 \end{bmatrix} e_{\alpha\beta} \quad (5)$$

$$\text{이때, } q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$$

식 (5)를 위상 동기화 기법의 입력으로 사용하면 외란이 포함된 전력 계통에서도 안정적으로 위상을 동기화시킬 수 있다.

2.2 SOGI를 이용한 직교 신호 발생

직교 신호를 발생시킬 수 있는 SOGI기반의 AF(Adaptive Filter)는 입력 주파수가 중심 주파수인 ω 와 동일한 경우 입력과 진폭이 같고 동상인 대역통과 필터의 특성을 갖는 v' 를 출력하며 입력과 진폭이 같고 90°의 위상 차이를 가지는 저역통과 필터의 특성을 갖는 qv' 를 출력한다. 출력 v' 와 qv' 에 대한 전달 함수를 식 (6), (7)에 나타내었다. AF의 대역폭은 중심 주파수 ω 와 독립적이며, 오직 이득 값 k 에 의해 결정이 된다. 그림 2를 살펴보면 출력 신호 qv' 는 중심 주파수 및 입력 주파수와 무관하게 항상 출력 v' 와 90° 지연된 신호가 출력된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이를 이용한 SOGI-QSG(Quadrature Signal Generator)는 가상의 직교 신호를 발생시킬 수 있으며 이는 PNSC(Positive and Negative Sequence Control)를 통해 계통의 3상 정상분 전압을 얻을 수 있다.

$$D(s) = \frac{v'}{v} = \frac{k\omega' s}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2} \quad (6)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v} = \frac{kw'^2}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (7)$$

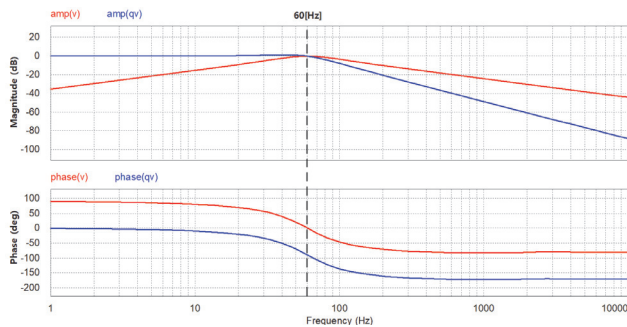


그림 2 SOGI 필터의 출력 v' 와 90° 위상차를 가지는 qv' 의 보드선도
Fig 2 Bode diagram of SOGI filter output v' and qv' with 90° phase shift

2.3 DSOGI-PLL를 이용한 위상 동기화 기법

전력 계통의 위상각을 검출하기 위해 사용되는 대표적인 방법 중 하나는 동기 좌표계의 d, q축에서 제어기를 이용하여 시스템과의 위상을 동기화하는 SRF-PLL기법이 있다. 이는 제어기가 전력 계통의 위상각을 계속 추종하기 때문에 구현이 간편하며 안정된 3상 전력 계통에서 높은 신뢰성을 갖는다. 식 (1~3) 조건에서의 동기 좌표계로 변환된 d축 전원 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_d^e = E_m \sin(\theta - \theta^*) \approx E_m (\theta - \theta^*) \quad (8)$$

$$e_d^{e*} = 0 \quad (9)$$

따라서 그림 3과 같이 PI 제어기를 이용하여 동기 좌표계의 d축 지령 전압을 0으로 추종하도록 제어하므로 제어기를 통해 얻은 제어 위상각과 전력 계통의 위상각을 동기화시키면 전력 계통의 위상각을 검출할 수 있다. 이를 이용한 DSOGI 기반 위상 동기화 기법 구조를 그림 3에 나타내었다[9].

그러나 전력 계통의 전압은 실제로 이상적이지 않으므로 SOGI를 이용한 AF는 입력신호의 주파수가 변화할 경우 출력 신호의 진폭이 입력과 동일하지 않다는 문제점이 발생한다. 따라서 입력 전압의 위상과 동기화하는 PLL 기법은 주파수가 변동하는 과도 조건에서 위상 점프(Phase Jump)에 따른 정확도와 동적 응답에 영향을 받는다. 따라서 중심 주파수 ω' 가 입력 주파수의 변동에 추종하기 위해 비교적 변화가 적은 입력 신호의 주파수를 추종하는 FLL기법을 고려해볼 수 있다[10].

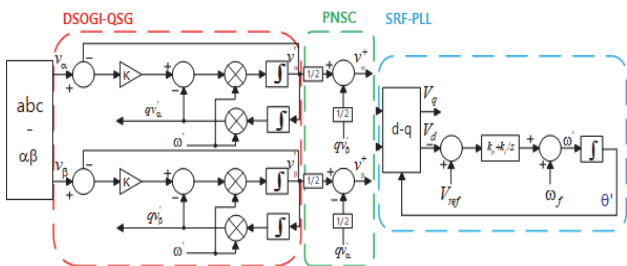


그림 3 DSOGI-PLL의 위상 동기화 기법 구조
Fig 3 DSOGI-PLL phase synchronization method structure

2.4 DSOGI-FLL를 이용한 위상 동기화 기법

FLL은 기존 SRF-PLL의 PI 제어기와 저역 통과 필터 없이 입력 전압과 90° 의 위상차를 갖는 qv' 를 이용하여 입력 주파수 ω 를 추종하고 이를 중심 주파수 ω' 로 사용하는 위상 동기화 기법이다. FLL의 입력신호에 대한 오차 신호의 전달 함수를 식 (10)에 나타냈으며 이에 대한 보드 선도를 그림4에 나타내었다.

$$E(s) = \frac{e_v}{v}(s) = \frac{s^2 + w'^2}{s^2 + kw's + w'^2} \quad (10)$$

그림 4에서 $\omega < \omega'$ 인 경우 qv' 와 e_v 는 동위상이며 $\omega > \omega'$ 인 경우 서로 반대 위상임에 따라 주파수 오차 e_f 는 qv' 와 e_v 의 곱으로 나타낼 수 있다. 이에 따라 FLL에서 음의 이득 Γ 와 적분기는 중심 주파수와 입력 주파수의 오차 e_f 를 0으로 수렴하게 하며, 최종적으로 ω' 가 ω 를 추종하게 하는 것이다.

이를 3상 전력 계통에서 사용할 경우 그림 5에서의 e_f 는 2상 정지좌표계의 α, β 축에서 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_f = e_\alpha + e_\beta = \frac{x_\alpha^2 + x_\beta^2}{k} (w'^2 - w_0^2) \quad (11)$$

따라서 그림 5의 추종할 중심 주파수 ω' 는 식 (12)과 같다.

$$w' \approx \frac{\Gamma w'^2 (x_\alpha^2 + x_\beta^2) (w' - w_0)}{(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2} \quad (12)$$

두 가지 위상 동기화 기법들을 하이브리드 APF에 적용하여 계통 주파수 변동 및 위상 변동 시의 특성을 비교 분석하였다.

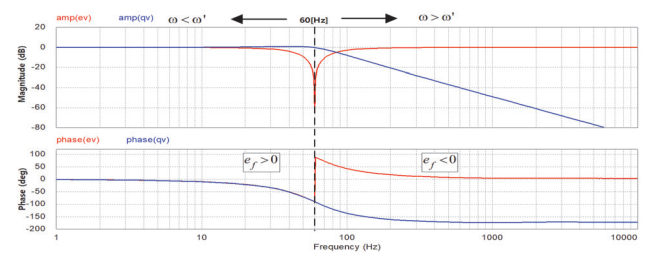


그림 4 SOGI-FLL의 90° 위상차를 가지는 출력 qv' 와 오차 e_v 의 전달함수
Fig. 4 DSOGI-FLL phase synchronization method structure

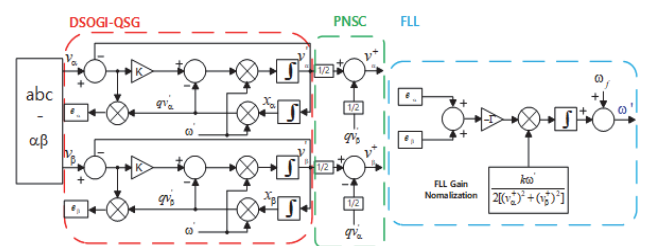


그림 5 DSOGI-FLL의 위상 동기화 기법 구조
Fig 5 DSOGI-FLL phase synchronization method structure

3. 계통 연계 성능 개선을 위한 DSOGI 기반 위상 동기화 기법들의 적용 비교 분석

본 논문에서는 하이브리드 APF의 계통 연계 위상 추종 성능을 확인하기 위해 전력 계통의 주파수 변동과 위상 변동 시의 모의실험을 PSIM을 이용하여 진행하였다. 모의실험에 사용한 하이브리드 APF의 구성도를 그림 6에 나타내었으며, 계통에 고조파 전류 유입을 가정하기 위해 3상 브릿지 정류기를 비선형 부하로 사용하였다. 모의실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

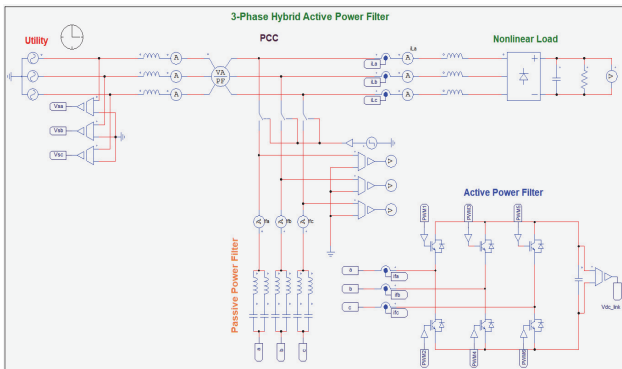


그림 6 하이브리드 APF의 모의실험 구성도

Fig 6 Hybrid APF simulation configuration diagram

표 1 하이브리드 APF의 모의실험 파라미터 표

Table 1 Table of simulation parameters of hybrid APF

Parameter	Value	Unit	Remarks
L-L Grid Voltage	380	[Vrms]	-
3-Phase angle	0, -120, +120	[Degree]	Variable
Grid Frequency	60	[Hz]	Variable
Switching Frequency	20	[kHz]	-
L5, L7	9.68, 4.84	[mH]	-
C5, C7	29.64, 29.64	[μF]	-
Dc Link Voltage	100	[V]	-
Grid Power Factor	98.5%	[%]	-

3.1 전력 계통의 주파수 변동 시 각 위상 동기화 기법 특성 비교 및 분석

전력 계통 주파수의 변동 시 DSOGI-PLL 및 DSOGI-FLL 기법들의 특성을 비교 분석하기 위해 3상 전력 계통의 주파수를 0.9[sec]에서 0.95[sec]사이에서 58[Hz]로 저감시킨 후 0.95[sec]에서 62[Hz]로 증감시켰으며 1[sec]에서 다시 60[Hz]로 회복되도록 설정하여 DSOGI-PLL 기법과 DSOGI-FLL 기법의 특성들을 비교 분석하였다. 그림 7은 주파수 변동 시의 (a)는 3상 전력 계통의 전압을 나타내며 (b)는 3상 전력 계통에 흐르는 전류를 나타낸다. 이는 정류기로 인해 발생한 고조파 전류가 계통 전류를 왜곡시킨 것이다. 그림 8은 동일 조건에서의 하이브리드 APF의 제어기 특성 및 출력을 나타낸다. (a)는 HAPF 제어기의 동기 좌표계 d축 전류값 (b)는 q축 전류값 (c)는 제어기의 추종 주파수 (d)는 추종 위상각 (e)는 HAPF 인버터의 DC Link 전압 (f)는 HAPF로 보상된 계통의 a상 전류를

나타낸다.

그림 8(c)에서 DSOGI-PLL 기법이 주파수 변동 시 비교적 높은 오버슈트와 언더슈트가 나타남에 비해 DSOGI-FLL 기법은 비교적 주파수 변동에 안정적으로 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그에 따라 APF의 DC Link 전압이 DSOGI-PLL의 전압이 -3.8~6.7[V] 정도로 비교적 크게 진동하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8(f)의 1[s]에서 계통 주파수가 60[Hz]로 회복되었을 때 하이브리드 APF로 보상한 계통 전류를 기존 계통에서의 성능으로까지 보상하기까지 DSOGI-FLL 기법은 0.033[s] 시간이 소요되었으며 DSOGI-PLL 기법은 0.052[s]의 시간이 소요되었다. 즉 계통 주파수 변동에서는 DSOGI-FLL 기법이 더 강한 특성을 가진다고 판단할 수 있다.

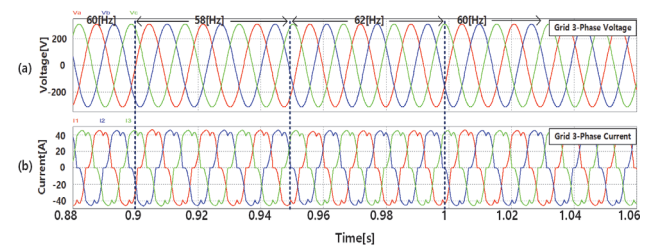


그림 7 계통의 주파수 변동 시 계통 전압, 전류 파형

Fig 7 Grid voltage and current waveforms in grid frequency variance

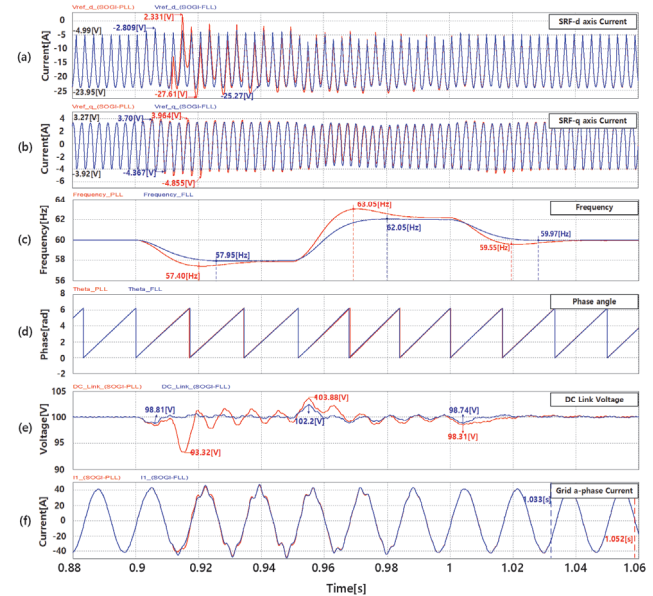


그림 8 계통 주파수 변동 시 위상동기화 기법들의 특성 분석 파형

Fig. 8 Characteristics analysis waveforms of phase synchronization method in grid frequency variance

표 2 주파수 변동 시 하이브리드 APF에서의 각 위상 동기화 기법의 특성 표

Table 2 Characteristic table of phase synchronization method with Hybrid APF in Frequency Variation

Characteristic	DSOGI-PLL	DSOGI-FLL	Unit
Peak Frequency(58Hz)	57.40	57.95	[Hz]
Peak Frequency(62Hz)	63.05	62.05	[Hz]
Peak Frequency(60Hz)	59.55	59.97	[Hz]
Peak DC Link	93.32~103.88	98.74~102.2	[V]
Compensation Current time	1.033	1.052	[s]

3.2 전력 계통의 위상 급변 시 각 위상 동기화 기법들의 특성 비교 및 분석

전력 계통에서 위상이 급변한 경우 DSOGI-PLL과 DSOGI-FLL 기법의 특성을 비교 분석하기 위해 3상 전력 계통의 각 상의 위상을 0.95[s]에서 30° 급변하였다. 그림 9는 계통의 위상 변동 시 (a)는 3상 전력 계통의 전압을 (b)는 3상 전력 계통의 전류를 나타낸다. 그림 10은 동일 조건에서의 HAPF의 각 위상 동기화 기법들의 특성을 나타낸다. (a)는 HAPF 제어기의 동기 좌표계 d축 전류값 (b)는 q축 전류값 (c)는 제어기의 추종 주파수 (d)는 추종 위상각 (e)는 HAPF의 DC Link 전압 (f)는 HAPF로 보상된 계통의 a상 전류 (g)는 계통 역률을 나타낸다.

그림 10(a)에서 하이브리드 APF의 무효전력을 제어하는 동기 좌표계 d축 전압이 DSOGI-PLL기법에서 DSOGI-FLL기법 보다 약 -4.24[V] 증가한 언더슈트가 나타났으며 이에 따라 DC Link 전압이 90.74[V]로 비교적 큰 언더슈트가 나타나며 역률이 과보상 되었다. 또한 DSOGI-FLL기법의 오버슈트가 더 크기에 따라 DC Link 전압이 106.88[V]로 비교적 높은 언더슈트가 나타나며 역률이 더 큰 폭으로 감소함을 확인할 수 있다.

그림 10(c)에서 DSOGI-FLL 기법이 DSOGI-PLL 기법에 비해 비교적 낮은 언더슈트와 오버슈트를 나타내었으며 60[Hz]로 회복되는 시간이 DSOGI-FLL 기법이 1.006[s], DSOGI-PLL 기법이 1.049[s]로 소요 시간이 적은 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 기존 APF로 보상한 계통의 역률 98.5[%]로 도달하기 까지 DSOGI-PLL 기법이 더 긴 시간이 소요되었다.

표 3 위상 변동 시 하이브리드 APF에서의 각 위상 동기화 기법들의 특성 표

Table 3 Characteristic table of phase synchronization method with hybrid APF in phase jump

Characteristic	DSOGI-PLL	DSOGI-FLL	Unit
Peak Frequency	51.31, 61.50	53.94, 60.05	[s]
Frequency Stabilization Time	1.006	1.049	[s]
Peak DC Link	90.74, 101.84	92.38, 106.88	[V]
Compensation Current Time	1.033	1.052	[s]

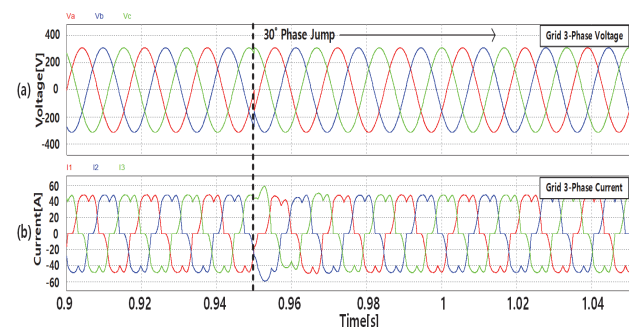


그림 9 계통의 위상 변동 시 계통 전압, 전류 파형
Fig 9 Grid voltage and current waveforms in grid phase jump

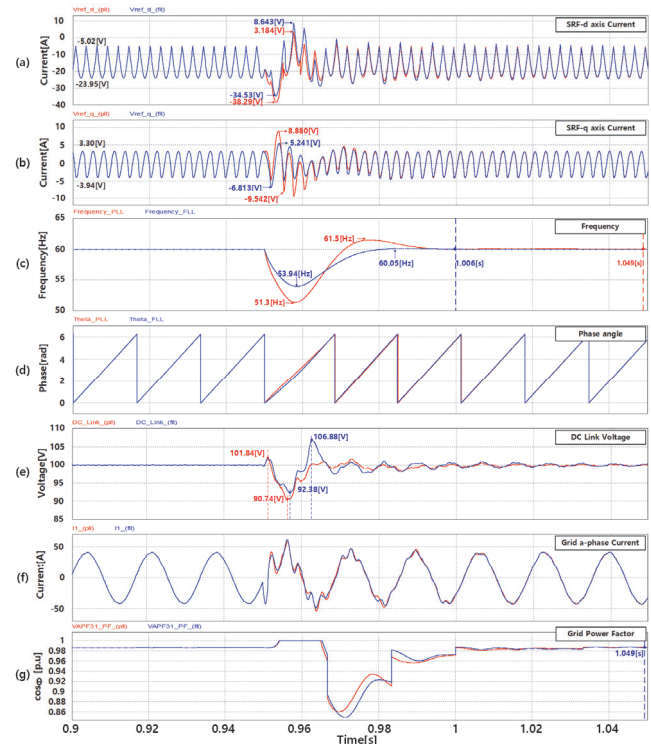


그림 10 계통 위상 변동 시 위상 동기화 기법들의 특성 분석 파형

Fig 10 Characteristics analysis waveforms of phase synchronization method in Grid Phase jump

4. 결론

본 논문은 전력 계통에서 비선형 부하로 인해 발생하는 각 차수 고조파 전류들에 대해 순시적으로 보상하는 하이브리드 APF의 전력 계통 연계 위상 추종 성능을 개선시키기 위해 DSOGI를 이용한 각 위상 동기화 기법들을 하이브리드 APF에 적용시켜 주파수 변동 및 위상 변동에 대한 특성을 비교 분석하였다.

모의실험을 진행한 결과 계통의 주파수를 변동한 경우를 살펴보면 계통의 주파수를 추종하는 DSOGI-FLL 기법이 입력신호의 위상과 동기화 시키는 기존의 DSOGI-PLL 기법에 비해 더 강한 위상 동기화 특성과 하이브리드 APF의 0.02[s] 빠른 전류 보상이 가능함을 확인할 수 있었다.

계통의 위상이 급변하였을 경우를 살펴보면 DSOGI-FLL 기법이 위상 동기화에 더 강한 특성을 가지나 DSOGI-PLL 기법 대비 제어기의 동기 좌표계 d축 전압 변동이 비교적 크기에 따라 5.04[V] 더 높은 DC Link 전압 변동이 발생하였으며 이에 따라 역률이 1.22[%] 더 저하되었음을 확인할 수 있었다. 그렇지만 DSOGI-FLL 기법이 DSOGI-PLL 기법에 비해 비교적 빠르고 정확한 전류 보상이 가능하므로 하이브리드 APF에 DSOGI-FLL 기법을 선정하여 적용한다면 외란이 포함된 3상 전력 계통에서도 위상 추종 성능을 개선시킬 수 있을 것이라 판단된다.

References

- [1] R. D. Henderson and P. J. Rose, "Harmonics: the effects on power quality and transformers," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, pp. 528-532, May-June 1994.
- [2] V. E. Wagner et al., "Effects of harmonics on equipment," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, April 1993, doi: 10.1109/61.216874.
- [3] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg and C. L. Bak, "A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 54-69, March 2016.
- [4] H. Fujita and H. Akagi, "Voltage-Regulation Performance of a Shunt Active Filter Intended for Installation on a Power Distribution System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 3, pp. 1046-1053, May 2007.
- [5] F. B. Libano, D. S. L. Simonetti and J. Uceda, "Frequency characteristics of hybrid filter systems," PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1996, pp. 1142-1148 vol.2, doi: 10.1109/PESC.1996.548725.
- [6] H. Fujita and H. Akagi, "A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 6, pp. 1020-1025, Nov.-Dec. 1991, doi: 10.1109/28.108451.
- [7] J. Wu, H. Jou, Y. Feng, W. Hsu, M. Huang and W. Hou, "Novel Circuit Topology for Three-Phase Active Power Filter," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 444-449, Jan. 2007.
- [8] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [9] S. Golestan, S. Y. Mousazadeh, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "A Critical Examination of Frequency-Fixed Second-Order Generalized Integrator-Based Phase-Locked Loops," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 9, pp. 6666-6672, Sept. 2017.
- [10] S. Golestan, J.M. Guerrero, J. C. Vasquez, A. M. Abusorrah and Y. Al-Turki, "Modeling, Tuning, and Performance Comparison of Second-Order-Generalized-Integrator-Based PLLs," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 12, pp. 10229-10239

Acknowledgments

This research is supported by "Rediscovery of the Past R&D Result" through the Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE) and the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) (Grant No.: P0017930) and was also supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194030202290).

저자소개



박현수 (Hyun-Soo Park)

He is pursuing his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail : sys5028@gachon.ac.kr



이현재 (Hyun-Jae Lee)

He received his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea, currently he is pursuing his Ph. D. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail : lhj501@gachon.ac.kr



박훈양 (Hoon-Yang Park)

He received his B.S. degree in the Department of Electrical Engineering from Soonsil University in 2011. He received his Ph. D. degree in the Department of Electrical Engineering from Gachon University in 2019. Currently he is CEO in Enerkeeper, CO., Ltd.

E-mail : ceo@enerkeeper.com



손진근 (Jin-Geun Shon)

He received his B.S., M.S. and Ph. D. degrees in the Department of Electrical Engineering from Soongsil University in 1990, 1992 and 1997. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 1992-1995. He was a Postdoctoral Researcher in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kagoshima University, from 2002 to 2003. He was also a Visiting Scholar in the Power Electronics Laboratory, Michigan State University, from 2009 to 2010. He is currently a Professor at the school of Electrical Engineering, Gachon University, Korea. His research interests are the power conversion, control and diagnosis of power utility.

E-mail : shon@gachon.ac.kr