

Power Decoupling Control Method of Grid-Forming Converter: Review

Hyeong-Seok Lee*, Yeong-Jun Choi*

*Student, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

*Assistant Professor, Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

[Abstract]

Recently, Grid-forming(GFM) converter, which offers features such as virtual inertia, damping, black start capability, and islanded mode operation in power systems, has gained significant attention. However, in low-voltage microgrids(MG), it faces challenges due to the coupling phenomenon between active and reactive power caused by the low line impedance X/R ratio and a non-negligible power angle. This power coupling issue leads to stability and performance degradation, inaccurate power sharing, and control parameter design problems for GFM converters. Therefore, this paper serves as a review study on not only control methods associated with GFM converters but also power decoupling techniques. The aim is to introduce promising control methods and enhance accessibility to future research activities by providing a critical review of power decoupling methods. Consequently, by facilitating easy access for future researchers to the study of power decoupling methods, this work is expected to contribute to the expansion of distributed power generation.

▶ **Key words:** Grid-forming, Power decoupling, Low-voltage microgrid, Power sharing, Distributed generators

[요 약]

최근 전력 계통에 인공 관성, 감쇠, 블랙스타트 기능, 독립 운전 기능 등을 제공할 수 있어 많은 주목을 받고 있는 Grid-forming(GFM) 컨버터는 저전압 Microgrids(MG)에서 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율과 작지 않은 전력각으로 인한 유효전력과 무효전력 간의 커플링 현상이 발생한다. 이러한 전력 커플링 현상은 GFM 컨버터의 안정성 및 성능 저하 문제, 부정확한 전력 공유 문제, 제어 파라미터 설계 문제를 유발하고 있다. 따라서 본 논문은 GFM 컨버터와 관련된 제어 방법뿐만 아니라 전력 디커플링 방법에 대한 검토 연구로서, 유망 제어 방법을 소개하고 전력 디커플링 방법에 대한 비판적 검토를 통하여 향후 연구 활동의 접근성을 높이고자 하였다. 이에 따라 전력 디커플링 방법 연구를 위해 향후 연구자들이 쉽게 접근할 수 있어 분산 발전원 확대에 기여할 수 있을 것이다.

▶ **주제어:** 그리드포밍, 전력 디커플링, 저전압 마이크로그리드, 전력 공유, 분산 발전원

-
- First Author: Hyeong-Seok Lee, Corresponding Author: Yeong-Jun Choi
 - *Hyeong-Seok Lee (lhs5444@stu.jeju.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
 - *Yeong-Jun Choi (yeongjun.choi@jeju.ac.kr), Dept. of Electrical Engineering, Jeju National University
 - Received: 2023. 10. 25, Revised: 2023. 11. 29, Accepted: 2023. 12. 01.

I. Introduction

최근 기후 변화 문제를 해결하기 위해 세계적으로 전력 전자 컨버터 기반의 분산 발전원의 비중이 증가함에 따라, 전력 계통의 관성 및 감쇠가 감소하여 전력 계통 안정성 문제가 대두되고 있다. 이 문제를 대처하기 위해 기존의 전력 계통의 전압과 주파수를 위상 고정 루프(Phase Locked Loop, PLL)을 통해 측정하여 전류를 주입하는 전류원 방식의 그리드팔로잉(Grid-Following, GFL) 제어 방법 대신, 임피던스 뒤에서 계통의 전압 및 주파수를 조정 가능한 전압원 방식의 GFM 제어 방법이 많은 관심을 받고 있다[1]. 앞서 설명한 장점 외에도 GFM 제어는 동기 발전기(Synchronous Generator, SG)의 역할을 모방하도록 제어하여 계통에 관성 및 감쇠를 제공하고, 블랙스타트 기능, 독립 운전 기능을 제공할 수 있다는 장점이 있다[2].

그러나 앞서 언급한 장점에도 불구하고 GFM 컨버터는 해결해야 할 몇 가지 과제가 존재한다. 기존의 회전기 기반 동기 발전기에 비해 전력전자 컨버터는 전력전자 스위칭 소자의 과전류 정격과 관성 응답을 제공하기 위한 에너지 저장 용량이 비교적 작아 계통 사고 시 계통을 지원할 수 있는 능력이 제한된다[1]. 또한 계통 연계 컨버터는 계통과 상호 접속되는 Point of Common Coupling(PCC)를 바라본 계통 임피던스의 영향이 크기 때문에 다양한 계통 임피던스 조건에서 과도 및 소신호 안정도 분석은 매우 중요하다. 그 외로는 블랙스타트 운전, 독립 운전 모드와 계통연계 모드 간 원활한 절제, 계통 임피던스에 따른 공진 문제 및 전력 커플링 문제가 있다.

본 논문은 위에 언급한 문제점 중 전력 커플링 문제에 대해 자세히 다루고자 한다. 저전압 MG의 경우 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율로 인해 유효전력과 무효전력 간의 심각한 커플링이 발생한다. 이로 인해 계통 연계 모드 시 GFM 컨버터의 안정성 및 성능을 크게 저하하고 적절한 제어 파라미터 설계를 까다롭게 하며, 독립 운전 모드 시 부정확 전력 공유와 불안정성 문제를 초래한다[3].

이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되었지만, 종합적으로 분석한 연구가 부족하며, 전력 디커플링 방법에 대한 리뷰 논문은 소개된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는 2장에서 기존의 연구된 다양한 GFM 제어 방법에 관해 소개 및 비교 분석한 후, 미래에 유망한 GFM 제어 방법에 대해 검토한다. 3장에서는 전력 커플링 현상에 대해 소개한 뒤, 다양한 GFM 전력 디커플링 제어 전략에 대해 검토한 후 전력 디커플링 방법에 대한 주요 쟁점을 제시한다. 결론에서는 본 논문의 기여점과 향후 연구에 대해 요약 설명하며 마무리한다.

II. The Review of the Grid-Forming Control Strategies

1. Study on Various Types of Grid-Forming Control Strategies

1.1 Grid-Forming Control Structure and Strategies

GFM 제어는 크게 동기기 기반의 제어 전략과 비선형 제어 전략으로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 이해하기 쉽도록 비선형 제어 전략(Virtual Oscillator Control, H_2/H_∞ 등)에 대한 소개는 생략하였다. 제안된 동기기 기반의 그리드 포밍 제어의 종류로는 Virtual Synchronous Machine(VISMA[4], VISMA I [5], VISMA II[6], CVSM[7]), Virtual Synchronous Generator(VSYNC[8]), Synchronverter [9], Power Synchronous Control(PSC)[10-11], Synchronous Power Control(SPC)[12-14] 등이 있다.

동기기 기반의 GFM 제어는 Fig. 1과 같이 크게 4가지 계층(계통 동기화 방법, 전기기계 상호작용, 전자기적 상호작용, 외부 루프)에 따라 분류할 수 있다. 계통 동기화 계층에서는 기존에 GFL 컨버터에서 주로 사용되던 전압 기반 동기화 방법과 전력 기반 동기화 방법이 있다. 전압 기반 동기화 방법의 단점은 낮은 단락 비율(SCR)인 약 계통 조건에서 PLL이 계통 전압을 적절히 추정할 수 없게 되어 발생하는 불안정성이다. 반면, 전력 기반 동기화 방법은 컨버터와 계통 간 상호작용의 결과인 전력 편차를 통해 계통 주파수를 추정하고 전력 균형을 이루기 때문에 다양한 SCR 조건에서 안정성을 유지할 수 있다. GFM 컨버터의 핵심 아이디어는 SG의 전기기계 루프의 역학인 운동(Swing) 방정식을 모방하여 계통에 동적 지원을 제공하는 것이다. 구현에 따라 운동 방정식은 부분적 또는 완전히 모방할 수 있다. 또한, 특정 상황에서는 향상된 전달 함수인 진상-지상 제어기[14-15]를 추가하여 감쇠 계수와 드롭 계수 간 커플링 문제를 해결할 수 있다. 이를 통해 GFM 제어는 바람직한 빠른 유효 전력 응답과 느린 주파수 동적 응답을 동시에 달성할 수 있다[15]. GFM 컨버터와 계통과의 전자기적 상호작용은 가상 고정자의 전기적 모델과 컨버터의 내부 제어기에 의한 컨버터 임피던스에 따라 크게 달라진다. 이러한 컨버터 임피던스는 계통 임피던스와 상호작용하여 컨버터의 과도 응답과 정상상태에 영향을 주기 때문에 이를 고려하여 내부 루프를 적절히 설계하는 것은 매우 중요하다. 또한, 특정 고조파를 감쇠시키기 위해 향상된 전자기적 루프를 추가로 구성할 수 있다 [13]. 마지막으로 GFM 컨버터는 SG처럼 주파수와 전압을

안전한 작동 범위 내에 유지하도록 외부 루프에 조속기 (Governor)와 자동 전압 조정기(Automatic Voltage Regulator, AVR)를 추가할 수 있다.

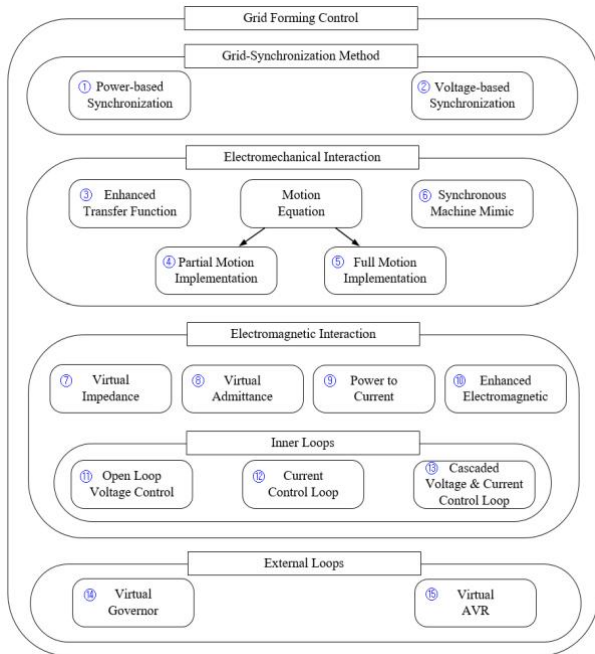


Fig. 1. Structure of Grid-Forming Control System

앞서 언급한 4가지 계층을 기반으로 Fig. 1에 나타난 번호에 맞게 제안된 동기화 기반의 GFM 제어 방법을 Table 1에 분류하였다. 이를 기반으로 제안된 다양한 GFM 제어 방법을 쉽게 구분할 수 있다.

1.2 Analysis of Various Grid-Forming Control Characteristics

H.-P. Beck et al.이 제안한 VISMA는 바람직하지 않더라도 SG의 모든 특성을 모방하려 하였으며, 히스테리시스 전류 제어를 사용하였다[4]. 많은 파라미터와 방정식으로 인해 연산 시간이 길며, 약한 감쇠와 느린 과도 응답을 갖는 단점이 있다. Y. Chen et al.이 제안한 VISMA I은 VISMA의 전기기계 루프를 L-R 어드미턴스로만 구성된 축소 모델로 단순화하였다[5]. 그러나 감쇠와 드롭 간의 커플링 문제를 해결하지 못하였다. Y. Chen et al.이 제안한 VISMA II는 가상 임피던스와 개루프 전압 제어를 사용하였다[6]. 개루프 전압 제어 방식은 필터 인덕턴스가 전력 역학에 포함되어 안정성을 높일 수 있지만[16], 과전류를 제한하기 위해 가상 임피던스와 같은 추가적인 제어 루프가 요구된다. S. D'Arco et al.이 제안한 CVSM은 캐스케이드 전압-전류 제어와 전기기계 루프에서 필요한 감쇠를 위해 PLL을 사용하였다[7]. 그러나 이 방식 또한 감쇠와

드롭 간의 커플링 문제를 해결하지는 못하였다. M. Van Wesenbeeck et al.이 제안한 VSYNC는 동기화와 전기기계적 상호작용이 PLL을 통해 달성된다[8]. 이러한 방식은 PLL의 비선형성과 불안정성을 포함하는 문제와 약한 감쇠 문제를 갖는다. Q.-C. Zhong et al.이 제안한 Synchronverter는 전자기적 상호작용을 위해 컨버터의 필터 인덕턴스를 사용하였다[9]. 그러나 필터 인덕턴스는 실제 SG의 고정자 인덕턴스보다 훨씬 작으므로 동일한 정격의 SG보다 덜 안정적이다. 또한, 개루프 전압 제어를 사용하기 때문에 과전류 제한 대책이 필요하다. L. Zhang et al.이 제안한 PSC는 운동 방정식을 구현하지 않고, 전력 요율과 이득의 곱을 직접 적분하여 컨버터의 위상각을 얻는다[10,11]. 따라서 유효 전력 제어 루프는 하나의 적분기로만 구성되므로 간단하지만, 관성과 감쇠를 제공할 수 없다. 감쇠를 제공하기 위해 측정된 전류를 고역 통과 필터링하여 가상 저항을 사용하였다[10,11]. PSC가 관성을 제공하기 위해서는 유효전력 측정 시 저역통과필터 (Low Pass Filter, LPF)를 사용하여 2차 시스템이 되도록 해야 한다. P. Rodriguez et al.이 처음 제안한 SPC는 전력 기반 동기화 방법을 통해 앞서 언급한 PLL의 단점을 해결하였으며[12], A. Tarrasó et al.은 SPC의 전자기적 루프에 병렬로 다수의 가상 어드미턴스를 사용하여 고조파 전류 보상을 통해 PCC 전압의 고조파를 감쇠시켰다 [13]. 또 다른 가상 어드미턴스의 장점은 가상 임피던스의 미분 항에 의한 잡음 문제를 피할 수 있다는 점이다[13]. 또한, W. Zhang et al.이 제안한 향상된 SPC는 유효 전력 루프를 진상-지상 제어기로 대체하여 감쇠 계수와 드롭 계수 간의 커플링 문제를 해결하였다[14]. 이를 통해 바람직한 빠른 유효 전력 응답과 느린 주파수 동적 응답을 달성할 수 있으며, 인버터 간의 정확한 전력 공유를 위해 원하는 드롭 계수를 설정할 수 있게 된다[14,15].

2. Discussion on Promising Future Grid-Forming Control Methods

향후 안정적이고 유연한 전력 계통을 갖추기 위해서는 그리드 코드에 맞게 다수의 인버터 간의 정확한 전력 공유 능력과 적절한 전력 진동 감쇠 능력을 갖추는 것은 필수적이다. 이를 위해서 앞서 언급한 감쇠 계수와 드롭 계수 간의 커플링 문제를 해결하는 것은 매우 중요하다. 따라서 그리드 코드에 맞게 원하는 파라미터를 설계할 수 있는 진상-지상 형태의 유효 전력 제어기가 유망할 것으로 생각된다. 이 제어기는 전자기적 루프가 가상 어드미턴스와 전류 제어기의 조합인 SPC 방법뿐만 아니라 전자기적 루프를

Table 1. Classification of Synchronous Machines-based Grid-Forming Control

Method	Grid Synchronization Method		Electromechanical Interaction				Electromagnetic Interaction						External Loops		
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
VISMA[4]	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×
VISMA I [5]	○	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×
VISMA II [6]	○	×	×	×	○	×	○	×	×	×	○	×	×	×	×
CVSM[7]	○	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	×	○	○	○
VSYNC[8]	×	○	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	×
Synchronverter[9]	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○	○
PSC[10]	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	×
SPC[14]	○	×	○	×	○	×	×	○	×	×	×	○	×	○	○

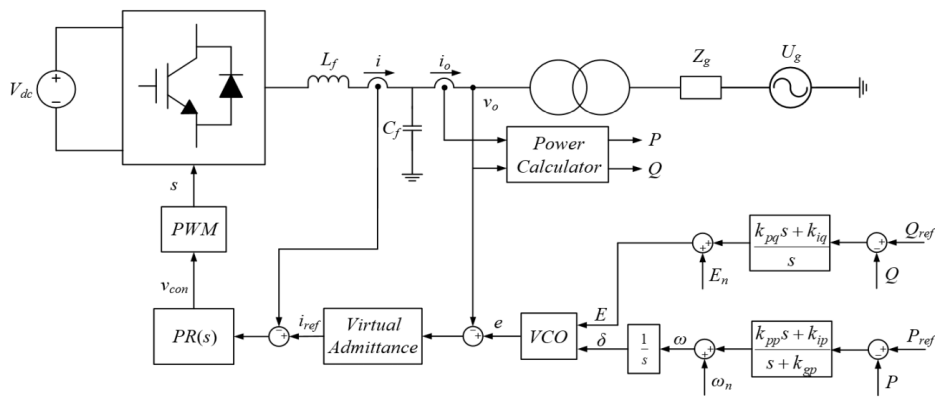


Fig. 2. Control Block Diagram of the Lead-Lag SPC[14]

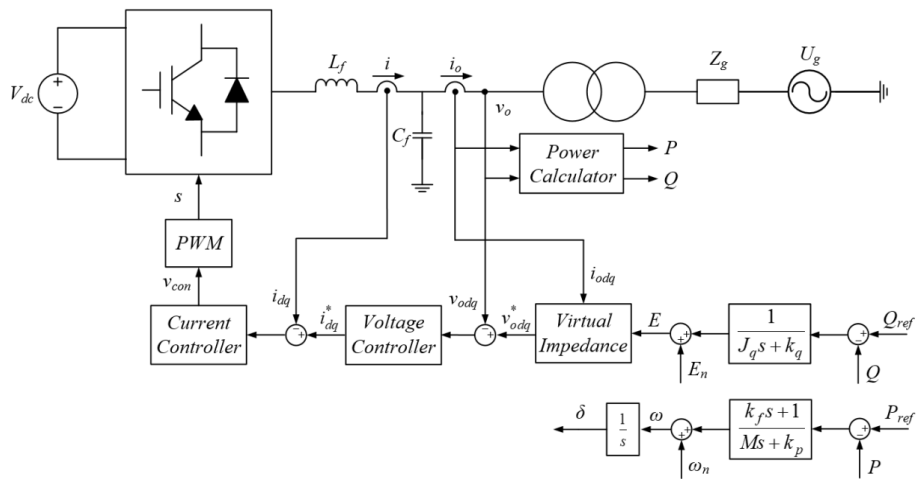


Fig. 3. Control Block Diagram of the PFD-VSG Control[15]

가상 임피던스와 캐스케이드 전압-전류 제어기의 조합인 CVSM 방법에도 적용할 수 있다. 그 예로 M. Li et al.이 제안한 PFD-VSG[15] 방법이 있다. Fig. 2는 진상-지상 전달 함수 구조의 PSC[14] 제어 블록 다이어그램과 Fig. 3은 제안한 PFD-VSG[15] 방법의 제어 블록 다이어그램을 보여준다. Fig. 2와 Fig. 3을 통해 알 수 있듯이, 두 방법 모두 유효 전력 루프의 전달 함수는 진상-지상 제어기 구

조를 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 두 방법 모두 정지 기준 좌표계 또는 회전 기준 좌표계에서 구현 가능하며, 부가적인 가상 어드미턴스 루프(전자의 경우)와 가상 임피던스 루프(후자의 경우)를 통해 특정 고조파를 감쇠시킬 수 있다. 가상 어드미턴스와 가상 임피던스는 각각 식 (1) 및 (2)와 같이 구현된다.

$$i_{ref} = \frac{1}{L_v s + R_v}(e - v) \quad (1)$$

$$v_o^{ref} = e - (L_v s + R_v)i_o \approx e - (j\omega_0 L_v + R_v)i_o \quad (2)$$

여기서 가상 임피던스의 인덕턴스를 구현 시 미분 항으로 인한 잡음 증폭 문제를 피하고자[17]와 같이 준-정적 모델로 근사화하여 적용할 수 있다.

앞서 언급한 SPC의 경우 어드미턴스 루프를 설계할 때 그리드 코드의 전압 지원 요구사항을 만족하기 위해 가상 인덕턴스를 0.3pu 값으로 설정한 후, 내부 전류 제어기의 대역폭의 1/10 이하 값이 되도록 가상 저항값을 선정한다 [18]. 반면에 CVSM의 경우 고조파 감쇠, 전력 디커플링, 부동기 공진 감쇠 등 특정 요구사항에 맞게 사용하게 된다 [19].

III. The Review of the Power Decoupling Control Methods for Grid Forming Control

1. The Review of Power Coupling Issues

Fig. 4는 Fig. 3을 기반으로 한 계통 연계 GFM 컨버터의 등가 회로도를 보여주며, Fig. 5는 Fig. 4를 기반으로 한 페이저 다이어그램을 보여준다. 여기서 V , I , Z_g , U 는 각각 컨버터 출력 전압, 출력 전류, 계통 임피던스, 계통 전압(평형 3상 전압이라 가정함)을 의미한다.

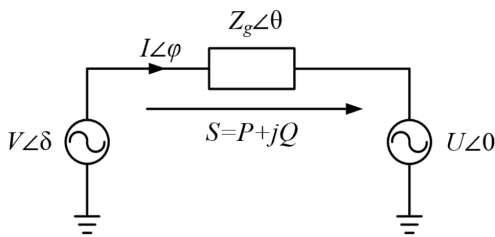


Fig. 4. Equivalent Circuit Diagram of the Grid-Connected Grid Forming Converter based on Fig. 3

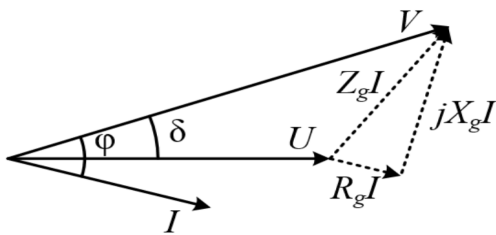


Fig. 5. Phasor Diagram based on Fig. 4

Fig. 4와 Fig. 5를 기반으로 컨버터에서 측정되는 출력 유효 및 무효전력은 각각 식 (3)과 (4)처럼 표현할 수 있다.

$$P = \frac{3V^2}{Z_g} \cos\theta - \frac{3UV}{Z_g} \cos(\theta + \delta) \quad (3)$$

$$Q = \frac{3V^2}{Z_g} \sin\theta - \frac{3UV}{Z_g} \sin(\theta + \delta) \quad (4)$$

$Z_g \angle \theta = R_g + jX_g$ 를 고려하면 식 (3)과 (4)는 (5)와 (6)처럼 다시 쓸 수 있다.

$$P = \frac{3R_g V^2}{Z_g^2} - \frac{3UV}{Z_g^2} (R_g \cos\delta - X_g \sin\delta) \quad (5)$$

$$Q = \frac{3X_g V^2}{Z_g^2} - \frac{3UV}{Z_g^2} (X_g \cos\delta + R_g \sin\delta) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 GFM 컨버터의 출력 전압과 전력각의 정상상태 동작점(아래 첨자 “0”으로 표기됨)과 동작점 주변의 소신호 편차(접두사 “ Δ ”로 표기됨)를 적용한 후, dc 항과 고차 항을 무시하면 GFM 컨버터의 소신호 모델 식 (7)과 (8)이 도출된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{P\delta} & H_{PV} \\ H_{Q\delta} & H_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H_{P\delta} = \frac{3UV_0}{Z_g^2} (R_g \sin\delta_0 + X_g \cos\delta_0) \quad (8)$$

$$H_{PV} = \frac{6R_g V_0}{Z_g^2} - \frac{3U}{Z_g^2} (R_g \cos\delta_0 - X_g \sin\delta_0)$$

$$H_{Q\delta} = \frac{3UV_0}{Z_g^2} (X_g \sin\delta_0 - R_g \cos\delta_0)$$

$$H_{QV} = \frac{6X_g V_0}{Z_g^2} - \frac{3U}{Z_g^2} (X_g \cos\delta_0 + R_g \sin\delta_0)$$

만약 계통 임피던스가 $X_g \gg R_g$ 이고 전력각이 매우 작다고 가정하면($\delta \approx 0$), (8)의 H_{PV} , $H_{Q\delta}$ 는 0이 되어 커플링 성분이 사라지게 되며, 식 (7)은 식 (9)와 (10)처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta P = 3 \frac{UV_0}{X_g} \Delta \delta \quad (9)$$

$$\Delta Q = 3 \left(\frac{2V_0 - U}{X_g} \right) \Delta V \quad (10)$$

식 (9)와 (10)을 통해 앞서 언급한 조건에서는 유효전력과 무효전력은 각각 전력각과 컨버터 전압을 통해 독립적으로 제어 가능하다. 그러나 저전압 계통에서는 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율로 인해 커플링 성분이 존재하며, [17]에 따르면 전력각은 유효 전력 지령과 계통 리액턴스에 따라 변하게 되어 매우 작다고 가정할 수 없다. 따라서

전력 디커플링 방법 설계 시 위에서 언급한 두 가지 요인을 고려하여 설계할 필요가 있다.

2. Study on Various Power Decoupling Control Methods

GFM 컨버터의 전력 커플링 문제를 해결하기 위해 다양한 전력 디커플링 제어 전략이 제안되었다. 제안된 전략은 가상 임피던스 방법[3,17,20-23], 선형 회전 변환 방법[24-27], 전향 보상 방법[28-32], 전류 보상 방법[33]으로 분류된다.

2.1 Virtual Impedance based Power Decoupling Control Method

가상 임피던스 방법의 원리는 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율을 높이고자 출력 전류를 피드백 받아 등가 출력 임피던스를 유도성을 띠도록 재구성하여 전력 커플링 문제를 해결하는 것이다. [3]에서는 개선된 음의 가상 저항을 정지좌표계에서 구현하여 전력 디커플링 문제를 완화하였다. 그러나 유효전력 지령을 인가하였을 시 무효전력의 정상상태 오차가 발생하는 문제점이 있다. [17]에서는 다양한 분석을 통해 최적의 준-정적 가상 인덕터 값을 도출하는 방법과 가상 인덕터의 디커플링 성능의 한계를 보여준다. [17]의 연구를 기반으로 [21]에서는 가상 인덕터의 디커플링 성능의 한계가 가상 인덕터에 의해 발생하는 d축 전압 강하로 인해 제한되기 때문이라고 밝혔다. 그리하여 d축 가상 인덕터 항을 제거한 후 최적의 가상 인덕터 값을 구하여 커플링 문제를 완화하였다. [23]에서는 [21]의 q축 가상 인덕터 기반 디커플링 방법의 아쉬운 동적 디커플링 성능을 향상시키기 위해 가상 인덕터-커패시터를 사용하여 과도 상태 구간에서 오버슈트를 줄였다. 그러나 실제 라인 임피던스를 실시간으로 변할 수 있기 때문에 오프라인으로 최적의 가상 인덕터 및 커패시터 값을 구하는 방법은 강인성을 보장하지는 못한다. 이 문제를 해결하고자 [22]에서는 슬라이딩 모드 제어기 기반의 적응형 가상 임피던스를 제안하였다. 이 방법의 핵심은 계통 임피던스를 추정하는 로직, 추정된 계통 임피던스를 컨버터 정격 출력을 고려하는 동시에 원하는 X/R 비율이 되게 설정하는 로직 및 가변 구조 가상 임피던스가 있다. 여기서 가상 임피던스는 음의 가상 저항과 가상 인덕터의 조합을 사용하여 커플링 문제를 완화하였다. 그 밖에 [20]에서는 비이상적인 계통으로 인한 고조파를 보상하기 위한 목적과 전력 디커플링 목적을 통합한 가상 임피던스를 제안하였다.

2.2 Linear Rotational Transformation based Power Decoupling Control Method

선형 회전 변환 방법 중 가상 전력 방법[24-25]은 임피던스 각을 이용한 선형 회전 변환 행렬 식 (11)을 통해 얻어진 가상 전력을 활용한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} X_g/Z_g & -R_g/Z_g \\ R_g/Z_g & X_g/Z_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P', Q'는 각각 가상 유효 및 무효전력이다. 식 (11)을 식 (5)와 (6)에 대입하고 전력각이 작다고 가정하면, 식 (12)와 (13)이 도출된다.

$$\delta \approx \frac{ZP'}{3UV} \quad (12)$$

$$V - U \approx \frac{ZQ'}{3V} \quad (13)$$

식 (12)와 (13)으로부터 알 수 있듯이 유효전력과 무효전력은 각각 전력각과 컨버터 전압을 통해 독립적으로 제어 가능하다. 그러나 이 방법은 각각의 분산 발전원에 연결된 라인 임피던스의 임피던스 각이 다르면 부정확한 전력 공유 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 [26]의 저자는 위와 유사한 원리로 주파수-전압을 식 (14)을 기반으로 선형 회전 변환하여 얻어진 가상 주파수-전압을 활용한다.

$$\begin{bmatrix} \omega' \\ E' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ E \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 ω' , E' 는 각각 가상 주파수 및 전압이다. 그러나 이 방법은 관성을 제공하는 기능이 없는 드롭 제어를 사용하여 연구되었기 때문에 GFM 컨버터에 적용하기 위해서는 부가적인 연구가 더 필요해 보인다. 앞서 언급한 전력 공유 문제를 해결하기 위해 [27]에서는 최적의 각을 적용한 통합 가상 전력 방법을 1차 저역통과필터 기반 드롭 제어에 적용하여 전력 공유 문제 및 전력 커플링 문제를 해결하였다. 그러나 이 방법의 단점은 계통 임피던스 추정 알고리즘의 의존도가 높다.

2.3 Feedforward Compensation based Power Decoupling Control Method

[28]에서는 (7)과 같이 동작점에서 선형화한 후 비대각 선 요소를 상쇄시키기 위해 전향 보상 행렬을 사용하여 전력 커플링을 완화시켰다. 그러나 실제 라인 임피던스와 동작점은 실시간으로 변화할 수 있어 강인성을 보장하기 위한 추가적인 알고리즘이 요구된다. [29]에서는 가상 임피던스와 particle swarm optimization 알고리즘 기반 교차 전향 보상을 사용하여 전력 커플링을 완화하였다. 그러나

이 방법은 높은 수학적 지식이 요구되며, 복잡한 설계 과정 때문에 실용성이 낮다. [30]에서는 강인하고 빠른 동적 응답의 전력 디커플링 성능을 얻기 위해 reaching phase가 없는 Total Sliding Mode Control(TSMC)를 무효전력 루프에 사용하였으며, 정확한 시스템의 동적 정보를 얻기 위해 adaptive-fuzzy-neural-network 알고리즘을 사용하였다. 다른 방법들과 다른 점은 무효전력 루프에만 커플링 성분을 보상하여 우수한 전력 디커플링 성능을 보여주었다는 것이다. 그러나 알고리즘이 매우 복잡하므로 실제 구현에 제한받는다는 단점이 있다. [31]에서는 전력 루프를 H_∞ loop shaping 방법을 통해 원하는 페루프 시스템 응답을 얻는 동시에 전력 커플링 성분을 상쇄하는 Optimization-based Multi-variable Primary Controller(OMPC) 방법을 제안하였다. 또한 Zero Steady-State Error 무효전력 제어기와 Fixed Steady-State Error 무효전력 제어기를 사용했을 때 기존의 가상 임피던스 방법과 제안한 전력 디커플링 방법을 비교하여 우수한 전력 디커플링 성능을 보여주었다. 그러나 이 방법은 [29]와 마찬가지로 높은 수학적 지식이 요구된다. [32]에서는 계통 임피던스의 변화에도 따른 강인성을 보장하고자 교차 전향 보상 제어기와 함께 Extended State Observer(ESO) 기반 전력 디커플링 방법을 제안하였다. 공칭 시스템 파라미터 조건에서 교차 전향 보상 제어기만 사용하여 (7)의 행렬의 비대각선 요소가 제거될 때의 디커플링 제어기 파라미터를 얻은 후, 라인 임피던스가 공칭 값에서 벗어나더라도 ESO를 통해 외란을 보상하여 우수한 디커플링 성능을 보여주었다. 그러나 제안한 가상 전력각 추정 방법은 근사화를 기반 추정하였기 때문에, 정확성을 보장하지 못하면 디커플링 성능에 영향을 줄 수 있다.

2.4 Current Compensation based Power Decoupling Control Method

[33]에서는 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율을 높이고자 가상 정상상태 동기 임피던스를 사용하였고, 작지 않은 전력각 문제를 해결하고자 전류 역학 디커플링 보상을 사용하였다. 그러나 실험적 증명이 높은 라인 임피던스 비율(X/R=4)에서 진행되었기 때문에 전력 커플링 문제를 해결하였다고 할 수 없다.

3. Discussion on Various Power Decoupling Control Methods

앞서 살펴본 전력 디커플링 제어 방법 중 향후 유망한 방법과 개선 사항에 대해 요약한 내용은 다음과 같다.

가상 임피던스 방법 중 q축 가상 인덕터 기반 디커플링 방법[21]과 가상 인덕터-커패시턴 방법[23]을 통해 정적 및 동적 디커플링 성능을 동시에 달성할 수 있었다. 그러나 동작점 또는 라인 임피던스의 변화에 따른 최적의 인덕터 또는 커패시터 값을 도출해야 하는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 [22]에서 제안한 방법처럼 적응형 제어 기반의 가상 임피던스 방법이 향후 연구될 수 있을 것이라 사료된다.

전향 보상 기반 전력 디커플링 제어 방법 중 H_∞ loop shaping 방법[31]은 가장 우수한 정적 및 동적 디커플링 성능을 달성할 수 있지만, 높은 수학적 지식이 요구되어 상용화의 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 좀 더 간단하며 좋은 디커플링 성능을 동시에 만족하는 방안이 향후 연구될 수 있을 것이라 사료된다.

그 외의 선형 회전 변환 기반 전력 디커플링 제어 방법은 GFM 컨버터에 적용되기 위해서는 추가적인 개선 및 검증이 필요할 것으로 사료되며, 전류 보상 기반 전력 디커플링 제어 방법은 라인 임피던스의 X/R 비율이 1인 조건에서 추가적인 실험을 통한 검증이 요구된다.

향후 저전압 MG에서 GFM 컨버터의 전력 디커플링 방법 연구 시 주요 쟁점은 다음과 같다.

저전압 MG에서 전력 커플링 요인인 낮은 라인 임피던스와 작지 않을 수 있는 전력각을 고려한 설계인지, 라인 임피던스의 변동과 동작점 변화에도 강인성을 보장할 수 있는지, 상용화를 위한 구현이 용이한 지, 전력 디커플링 성능과 분산 발전원 간 정확한 전력 공유 성능이 동시에 만족할 수 있는 지이다. 마지막으로 2장에서 언급한 진상-지상 형태의 유효전력 제어기와 3장에서 언급한 두 종류의 무효전력 제어기에 대해 적용과 다양한 라인 임피던스 조건(SCR 및 X/R 비율)에서 실험적 검증은 타당성과 유효성을 높여줄 것이라 사료된다.

IV. Conclusions

본 논문은 먼저 다양한 GFM 제어 방법에 대해 소개한 뒤 심층적으로 분석한 결과 향후 진상-지상 제어기 구조의 유효전력 제어 루프가 드롭 계수와 감쇠 계수를 독립적으로 설계할 수 있어서 주로 사용될 것으로 기대되며, II-2장에서 진상-지상 제어기 구조의 유효전력 제어를 적용한 두 가지 형태의 GFM 제어구조를 보여준다.

다음으로는 저전압 MG에서 낮은 라인 임피던스의 X/R 비율과 작다고 가정할 수 없는 전력각으로 인해 발생하는

전력 커플링 문제로 인한 악영향을 소개하고 원인을 분석하였다. 이러한 전력 커플링 문제를 해결하기 위해 근래까지 선행 연구된 다양한 GFM 컨버터의 전력 디커플링 제어 방법에 대해 분석하였다. 분석한 결과를 바탕으로 III-3장에서 주요 쟁점과 향후 전망에 대해 논의하였다.

이를 통해 GFM 컨버터 제어 기술과 향후 저전압 배전 계통에 필요한 전력 디커플링 제어 기술에 대해 쉽게 접근할 수 있어, 앞으로 분산 발전원 확대에 기여되길 기대한다.

향후 연구로 개선된 GFM 제어 방법과 전력 디커플링 제어 방법에 관해 실험적 검증을 기반한 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the 2023 scientific promotion program funded by Jeju National University.

REFERENCES

- [1] R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, "Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—A review," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 93-109, 2021. DOI: 10.1109/OJIA.2021.3074028
- [2] D. B. Rathnayake et al., "Grid forming inverter modeling, control, and applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114781-114807, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104617
- [3] P. Zhang, H. Zhao, H. Cai, J. Shi, and X. He, "Power decoupling strategy based on 'virtual negative resistor' for inverters in low-voltage microgrids," *IET Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 1037-1044, 2016. DOI: 10.1049/iet-pel.2015.0137
- [4] H.-P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," in 2007 9th international conference on electrical power quality and utilisation, 2007: IEEE, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424220
- [5] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Dynamic properties of the virtual synchronous machine (VISMA)," *Proc. Icrepq*, vol. 11, pp. 755-759, 2011. DOI:10.24084/REPQJ09.444
- [6] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner, and H.-P. Beck, "Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters," in International conference on renewable energies and power quality, 2012, vol. 1, no. 10. DOI:10.24084/REPQJ10.453
- [7] S. D'Arco, J. A. Suul, and O. B. Fosso, "Control system tuning and stability analysis of virtual synchronous machines," in 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013: IEEE, pp. 2664-2671. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647045
- [8] M. Van Wesenbeeck, S. De Haan, P. Varela, and K. Visscher, "Grid tied converter with virtual kinetic storage," in 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 2009: IEEE, pp. 1-7. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282048
- [9] Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, 2010. DOI: 10.1109/TIE.2010.2048839
- [10] L. Zhang and H.-P. Nee, "Multivariable feedback design of VSC-HVDC connected to weak ac systems," in 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 2009: IEEE, pp. 1-8. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282110
- [11] L. Zhang, L. Harnefors, and H.-P. Nee, "Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 25, no. 2, pp. 809-820, 2009. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2032231
- [12] P. Rodriguez, I. Candela, and A. Luna, "Control of PV generation systems using the synchronous power controller," in 2013 IEEE energy conversion congress and exposition, 2013: IEEE, pp. 993-998. DOI: 10.1109/ECCE.2013.6646811
- [13] A. Tarrasó, J. I. Candela, J. Rocabert, and P. Rodriguez, "Grid voltage harmonic damping method for SPC based power converters with multiple virtual admittance control," in 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017: IEEE, pp. 64-68. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8095762
- [14] W. Zhang, A. M. Cantarellas, J. Rocabert, A. Luna, and P. Rodriguez, "Synchronous power controller with flexible droop characteristics for renewable power generation systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1572-1582, 2016. DOI: 10.1109/TSTE.2016.2565059
- [15] M. Li et al., "Phase feedforward damping control method for virtual synchronous generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 8, pp. 9790-9806, 2022. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3150950
- [16] W. Du et al., "A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 963-975, 2019. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2942491
- [17] T. Wen, X. Zou, D. Zhu, X. Guo, L. Peng, and Y. Kang, "Comprehensive perspective on virtual inductor for improved power decoupling of virtual synchronous generator control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 4, pp. 485-494, 2020. DOI: 10.1049/iet-rpg.2019.0405
- [18] W. Zhang, "Control of grid connected power converters with grid support functionalities," 2017. DOI: 10.5821/dissertation-2117-110897

- [19] X. Wang, Y. W. Li, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, "Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 7019-7037, 2014. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2382565
- [20] Y. Hu, Y. Shao, R. Yang, X. Long, and G. Chen, "A configurable virtual impedance method for grid-connected virtual synchronous generator to improve the quality of output current," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 3, pp. 2404-2419, 2019. DOI: 10.1109/JESTPE.2019.2918386
- [21] T. Wen, D. Zhu, X. Zou, B. Jiang, L. Peng, and Y. Kang, "Power coupling mechanism analysis and improved decoupling control for virtual synchronous generator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 3, pp. 3028-3041, 2020. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3017254
- [22] R. L. de Araujo Ribeiro, A. Oshnoei, A. Anvari-Moghaddam, and F. Blaabjerg, "Adaptive Grid Impedance Shaping Approach Applied for Grid-Forming Power Converters," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 83096-83110, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3196921
- [23] B. Long, S. Zhu, J. Rodriguez, J. M. Guerrero, and K. T. Chong, "Enhancement of Power Decoupling for Virtual Synchronous Generator: A Virtual Inductor and Virtual Capacitor Approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 7, pp. 6830-6843, 2022. DOI: 10.1109/TIE.2022.3206701
- [24] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1107-1115, 2007. DOI: 10.1109/TPEL.2007.900456
- [25] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, A. Luna, P. Rodríguez, and R. Teodorescu, "Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4088-4096, 2009. DOI: 10.1109/TIE.2009.2027921
- [26] Y. Li and Y. W. Li, "Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 30-40, 2011. DOI: 10.1109/TSG.2010.2095046
- [27] T. Wu, Z. Liu, J. Liu, S. Wang, and Z. You, "A unified virtual power decoupling method for droop-controlled parallel inverters in microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 5587-5603, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2497972
- [28] B. Li and L. Zhou, "Power decoupling method based on the diagonal compensating matrix for VSG-controlled parallel inverters in the microgrid," *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2159, 2017. DOI: 10.3390/en10122159
- [29] Z. Peng et al., "Droop control strategy incorporating coupling compensation and virtual impedance for microgrid application," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 277-291, 2019. DOI: 10.1109/TEC.2019.2892621
- [30] Y. Wang and R.-J. Wai, "Adaptive fuzzy-neural-network power decoupling strategy for virtual synchronous generator in micro-grid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 4, pp. 3878-3891, 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3120519
- [31] D. B. Rathnayake and B. Bahrani, "Multivariable control design for grid-forming inverters with decoupled active and reactive power loops," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 1635-1649, 2022. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3213692
- [32] N. Dong, M. Li, X. Chang, W. Zhang, H. Yang, and R. Zhao, "Robust Power Decoupling Based on Feedforward Decoupling and Extended State Observers for Virtual Synchronous Generator in Weak Grid," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 576-587, 2022. DOI: 10.1109/JESTPE.2022.3207973
- [33] M. Li, Y. Wang, Y. Liu, N. Xu, S. Shu, and W. Lei, "Enhanced power decoupling strategy for virtual synchronous generator," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 73601-73613, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2987808

Authors



Hyeong-Seok Lee received the B.S. degrees in Electronic Engineering from Jeju National University, Korea, in 2020. He is currently working toward the M.S. degree in electrical engineering, Faculty of Applied Energy System.

His research interests include modeling and control of converters, microgrids, power system stability and control, and renewable energy integration.



Yeong-Jun Choi received the B.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013 and 2019, respectively. From 2018 to 2020, he was a senior researcher with Korea

Electric Power Corporation Research Institute. Since 2020, he has been with Jeju National University, where he is currently an Assistant Professor with Department of Electrical Engineering. His research interests include modeling and control of power conversion circuit including power converter system for renewable energies, battery energy storage systems, resonant converter and power factor correction converter.