

그리드 포밍 컨버터의 Soft Start-Up 기능 구현

맹 준 열, 최 성 휘
서울대학교

Implementation of Soft Start-up for Grid-Forming Converter

Junyeol Maeng, Shenghui Cui
Seoul National University

ABSTRACT

Grid-Forming 컨버터를 제어하기 위해 가상 동기 발전기를 구성하는 알고리즘에는 여러 방법이 제안, 연구되고 있다. 하지만 현재 각각의 방법에 대해 컨버터의 안정적 계통 투입과 초기 운전을 위한 Soft Start-up 기능에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 논문에서는 Grid-Forming 컨버터의 Soft Start-up 특성에 대해 고찰하고, Synchronous Power Control 방법 기반으로 해당 기능을 구현하는 방법에 대해 서술하였다. 구현된 방법은 HILS 실험 결과를 통해 검증하였다.

1. 서 론

최근 들어 신재생 에너지 기반 발전 기술 등의 개발로 전력 계통에 연결되는 전력전자 기술 기반 발전원의 용량이 빠르게 증가하고 있다. 하지만 이러한 추세는 기존 동기 발전기의 관성으로 유지되던 계통 주파수의 안정성을 약화시키게 되고, 이에 따라 계통 연계형 컨버터의 출력 전력 제어 및 주파수 안정성 기어 등에 대한 다양한 요구가 늘어나고 있다.

기존의 전력전자 발전원은 그리드 팔로잉 (grid-following, GFL) 방식을 통해 계통에 연계되었다. 그리드 팔로잉 방식은 위상동기회로를 이용한 계통과의 동기화를 통해 컨버터를 제어하는 방법이다. 하지만 계통의 강도가 약한 경우 위상동기회로 자체의 제어가 불안정해 컨버터가 계통에서 탈락하는 단점이 존재한다.^[1] 반면 그리드 포밍 (grid-forming, GFM) 방식은 동기 발전기의 외부 특성을 모의하여 컨버터를 제어하며, 결과적으로 계통의 관점에서 전력전자 발전원이 동기 발전기와 동일하게 보이도록 운전한다. 따라서 동기 발전기의 전력 기반 동기화 방식을 그대로 적용하여 위상동기회로의 이용 없이도 계통과의 동기화가 가능하다.^[2]

이러한 가상의 동기 발전기를 구성하는 제어 알고리즘은 여러 가지가 제안되었지만, 현재 다양한 연구들은 주로 정상 운전 시 성능 또는 전력 계통 시스템 안정성에 미치는 영향에 대해서 이루어지고 있다. 하지만 이와 별개로 계통 연계형 컨버터의 최초 투입 시 과도한 돌입 전류 및 유무효전력의 억제를 위한 Soft Start-up 기능에 대해서도 많은 연구가 필요한 상황이다.

본 논문에서는 계통 연계형 컨버터의 Soft Start-up 방법에 대해 고찰하고, 특히 Synchronous Power Control (SPC) 방식을 기반으로 구성된 그리드 포밍 컨버터에 대해 제어 원리 및 Soft Start-up 기능의 구현 방법을 서술하였다.

2. Synchronous Power Control

SPC 기반의 GFM 컨버터는 동기 발전기의 핵심 특성을 모방하여 제어를 수행한다. 따라서 실제 동기 발전기와 유사하게 계통과의 동기화가 출력 전력을 기반으로 자동으로 이루어지며 컨버터가 전압원으로 동작해 별도의 시스템 절환 없이 계통 사고의 대처나 단독 운전이 가능하다는 장점을 가진다. SPC의 동기 발전기 모의 방법과 그에 따른 핵심 특성은 제어기 구조의 여러 계층을 통해 정의될 수 있다.

2.1 전자기적 특성 모의

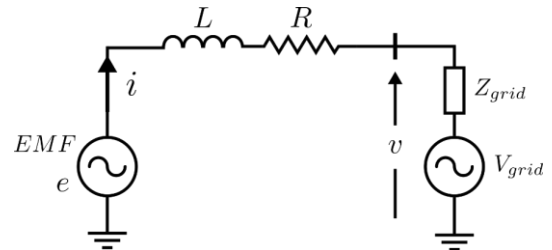


그림1 동기 발전기 계통 연계 등가 회로 구성도

동기 발전기의 계통 연계 등가회로는 그림 1과 같이 기전력과 고저자 임피던스가 직렬로 연결된 모델로 나타낼 수 있다. 이러한 모델에서 출력 전류는 기전력과 계통 전압의 차이, 임피던스에 의해 아래 수식과 같이 결정된다.

$$v(s) = e(s) - i(s)(R + Ls)$$

SPC에서는 위와 같은 전압, 전류 관계를 가상 어드미턴스 블록을 통해 모의한다. 해당 방법은 임피던스 형태를 사용하는 방법에 비해 제어기에서 미분 성분을 사용하지 않기 때문에 노이즈에 강인하며 제어 안정성이 높다.^[3] 가상 어드미턴스 블록의 구조는 그림 2와 같다.

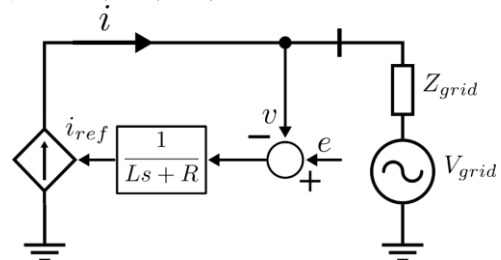


그림2 가상 어드미턴스 블록 구성도

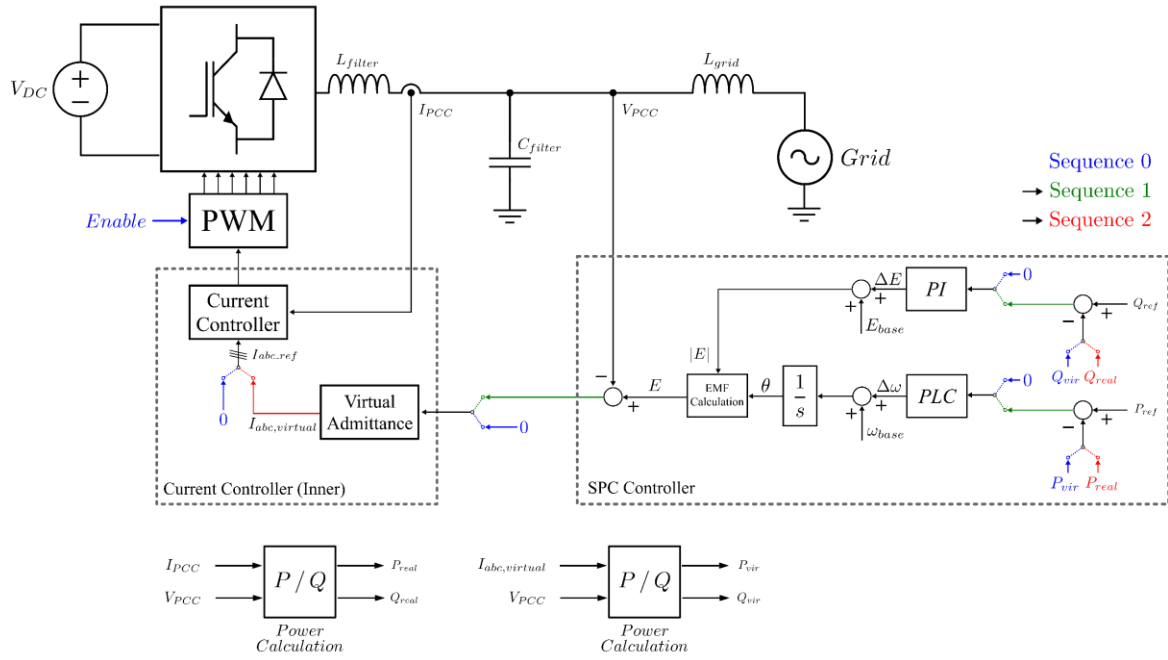


그림4 Soft Start-up 기능이 추가된 SPC 제어기 구성도

2.2 기계적 특성 모의

실제 동기 발전기는 관성과 댐핑 성분을 포함하는 Swing Equation을 기반으로 동작해 출력 전력 기반의 계통 동기화가 가능하다.

$$\text{Swing Equation} : J \frac{d\omega_r}{dt} + D\Delta\omega_r = T_m - T_e$$

SPC에서는 Power Loop Controller (PLC) 구조를 통해 위와 같은 Swing Equation 동작을 모의할 수 있다.^[4] PLC 블록은 유효 전력 지령과 현재 출력 유효 전력의 차이를 입력받아 가상 동기 발전기의 각속도 및 위상각을 계산할 수 있으며, 그 전달 함수는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P}(S) = \frac{1}{\omega_s(Js + D)}$$

2.3 무효 전력 제어

무효 전력 제어기는 무효 전력 지령과 현재 무효 전력의 차이를 입력받아 PI 제어기를 통해 가상 동기 발전기의 기전력 크기를 제어한다. 최종적으로는 기전력의 크기와 함께 PLC 블록에서 출력한 위상각 정보를 사용해 가상 동기 발전기의 기전력 전압 벡터를 계산한다.

3. SPC 기반 GFM 컨버터의 Soft-Start Up

3.1 Soft Start-Up 기능의 필요성

일반적으로 동기 발전기는 과도 상황에서 최대 5~7 p.u.의 과전류를 공급할 수 있는 능력이 있고, 큰 회전 관성을 가지고 있기 때문에 이미 발전기를 구동시킨 후 계통에 투입하는 경우가 대부분이다.^[5] 하지만 계통 연계형 컨버터의 경우 대부분 돌입 전류를 제한하기 위해 먼저 차단기를 통해 컨버터를 계통에 투입시킨 이후, DC-Link 커패시터 충전

과정을 거쳐 동작시키는 것이 산업계에서 널리 사용되는 방법이다. 특히 동기 발전기를 모의하는 그리드 포밍 컨버터는 이와 같은 방법으로 동작시키기 위해서는 적절한 Soft Start-up 과정을 통해 제어기를 활성화시키는 것이 매우 중요하다. 이는 만약 가상 동기 발전기의 기전력과 계통의 전압 차이 성분이 매우 큰 상태로 컨버터가 운전을 시작할 경우 과도한 전류 지령이 생성되어, 컨버터의 반도체 소자 한계를 초과하는 전류가 흐르거나 원하지 않는 유효전력을 계통에 공급하는 결과로 이어질 수 있기 때문이다.

3.2 Soft Start-Up을 위한 제어 목표 설정

SPC 제어기에서 Soft Start-up을 구현하기 위해서는 가상 동기 발전기 모의 제어기를 활성화시키기 전에 전류 제어기에서 출력하는 전류 지령을 0으로 만드는 것이 필요하다. 하지만 전류 제어기의 출력은 가상 어드미턴스 블록에서 가상 동기발전기의 기전력과 계통 전압의 차이에 의해 발생한다. 따라서 계통 전압과 기전력을 동기화시키는 것이 Soft Start-up을 위해 만족해야하는 목표가 된다.

본 논문에서는 가상의 가상 동기 발전기 개념을 통해 Soft Start-up 방법을 구현하였다. 해당 방법은 Start-up 과정동안 실제 가상 동기 발전기의 전류는 0으로 유지하지만, 가상 동기 발전기와 동일한 가상의 가상 동기발전기가 있다고 가정하고 제어를 수행해 계통 전압과 기전력이 일치하도록 동기화를 진행한다.^[6]

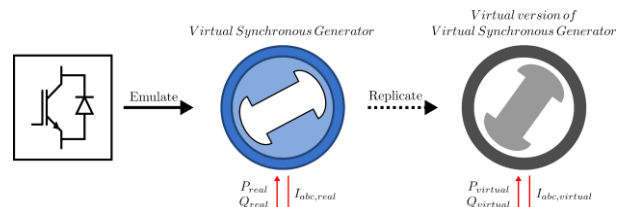


그림3 가상의 가상 동기 발전기를 통한 Soft Start-Up 개념

3.3 Soft Start-Up Sequence

가상의 가상 동기 발전기 개념을 사용하기 위한 총 3가지의 Soft Start-up Sequence가 포함된 SPC의 제어기 구조는 그림 4와 같다.

3.3.1 Sequence 0

차단기를 통한 컨버터의 계통 투입 후 먼저 전류 제어기와 컨버터의 스위칭 동작을 활성화한다. 하지만 전류 지령은 0으로 고정된 상태이기 때문에, 컨버터의 동작이 계통에 미치는 영향은 거의 없다.

3.3.2 Sequence 1

다음으로는 전류 지령을 계산하기 위한 가상 어드미턴스 블록과 가상 동기발전기의 기전력을 결정하는 SPC 내부 제어기가 활성화된다. 하지만 가상의 가상 동기발전기 개념을 적용해 SPC 제어기의 입력으로 실제 출력 전력 대신 가상의 유무효전력을 사용한다.

가상의 유무효전력은 어드미턴스 블록에서 출력되는 전류 지령대로 가상의 가상 동기발전기에 전류가 흐르고 있다고 가정한 뒤, 해당 전류와 계통 전압을 사용해 계산한 출력 전력이다.

이 때 유무효전력 지령은 0으로 유지되고 있으므로, SPC 내부 제어기가 동작하여 가상의 유무효전력을 0으로 제어하게 되고 이에 따라 가상 동기 발전기의 기전력은 계통 전압과 완전히 동기화된다.

3.3.2 Sequence 2

계통과의 동기화가 이루어진 뒤에는 정상 운영을 위해 전류 제어기의 입력으로 가상 어드미턴스 블록의 출력을 사용하고, SPC 제어기에 실제 컨버터 출력 전류를 이용해 계산한 유무효전력을 사용하는 제어 전환이 이루어진다. 하지만 이미 동기화가 이루어져있기 때문에 해당 과정에서 전류와 유무효전력은 과도 현상 없이 0으로 유지되게 된다. Sequence 2 이후에는 Soft Start-up이 완료되고, 실제 유무효전력 지령을 통해 그리드 포밍 컨버터의 정상 운영이 가능하게 된다.

위와 같은 제어 전략을 적용해 GFM 컨버터를 동작시키면, 별도 제어 알고리즘의 추가 사용 없이 기존의 제어기를 활용해 Soft Start-up이 가능하다는 장점을 가진다.

4. HILS 실험을 통한 검증

SPC 기반 GFM 컨버터의 Soft Start-up 기법에 대한 타당성 검증을 위해 HILS 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시스템 구성과 조건은 그림 5 및 표 1과 같다.

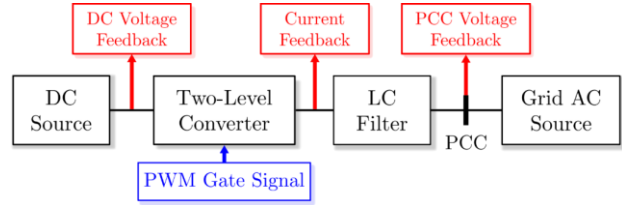


그림5 실험 진행 시스템 구성도

표 1 실험 조건

Parameter	Value
Rated Power	250 kW
DC Voltage	1100 V
Grid Voltage	400 V (line-line rms)
Filter Inductance	300 μ H
Filter Capacitance	100 μ F
Grid Inductance	0.085 mH

4.1 HILS 실험 결과

실험은 Typhoon-HIL 사의 HIL606 장비를 사용해 수행되었다. 실험의 하드웨어 구성은 그림 6과 같다.

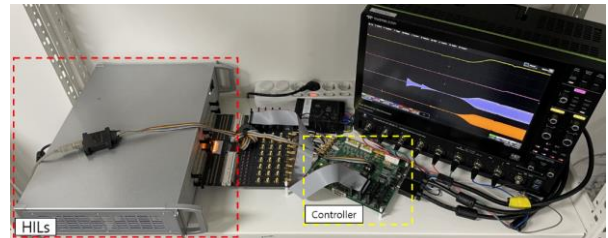


그림6 HILS 실험 하드웨어 구성

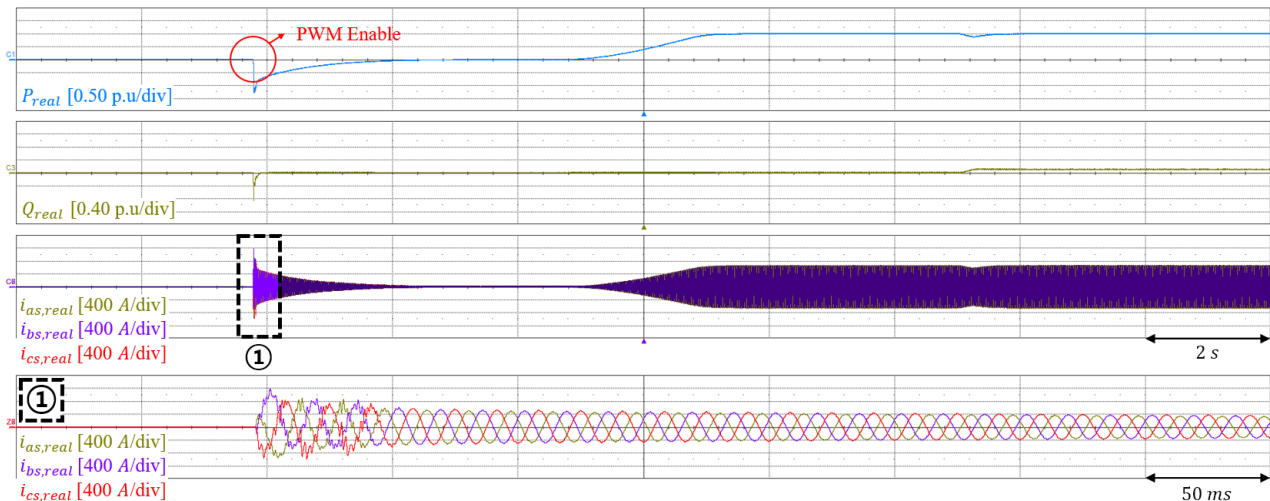


그림7 Soft Start-up 기능이 없는 GFM 컨버터의 동기화 과정

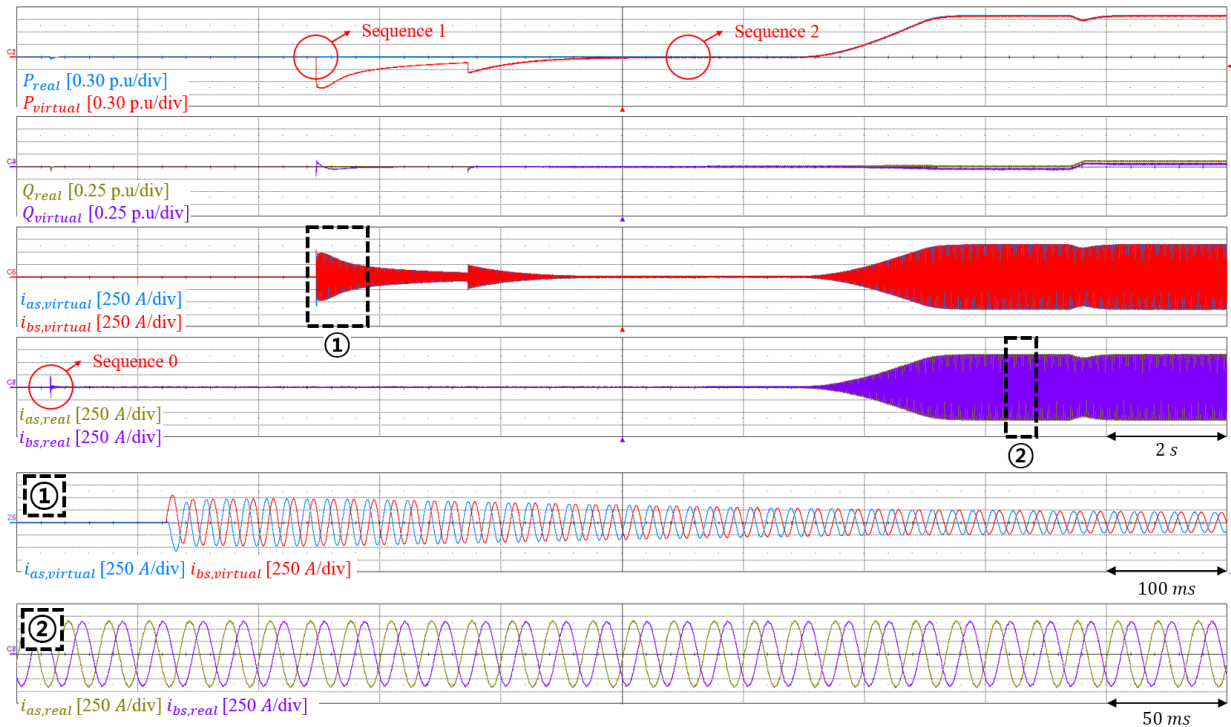


그림8 Soft Start-up 기능을 통한 GFM 컨버터의 동기화 과정

그림 7의 실험 결과에서는 Soft Start-up 기능이 없는 GFM 컨버터의 초기 동작 시 출력 유효전력과 전류를 나타내었다. 이 경우 최초 동작 시 가상 동기 발전기 기전력과 계통 전압의 차이 때문에 실제 전류가 발생하며, 유효전력에도 과도 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다.

반면 그림 8의 실험 결과에서는 앞서 살펴본 Soft Start-up 기능이 추가된 GFM 컨버터의 출력 유효전력과 전류를 확인할 수 있다. Sequence 0에서는 컨버터가 투입되고, 스위칭 동작을 시작함에 따라 약간의 과도 전류가 도통하지만 해당 전류는 바로 0으로 제어된다. 이후에 Sequence 1과 2를 차례로 동작했을 때, 가상의 가상 동기발전기 출력 전류와 유효전력이 발생하는 것을 볼 수 있고, 해당 성분을 0으로 제어하는 동기화 과정이 이루어진다. 이 때 Sequence 1과 2 사이의 과도 현상은 가상 어드미턴스를 정상 운전 시 값으로 변화시키면서 발생하였다. 또한 해당 과정 동안 실제 출력 전류와 유효전력이 발생하지 않고, 출력 전력의 지령 투입 시 처음으로 변화하는 것을 통해 Soft Start-up이 성공적으로 이루어졌음을 검증할 수 있다. 또한 Start-up 과정 이후 출력 전류가 정현과 파형으로 유지되는 것을 통해 제어 안정성 또한 유지되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

계통 연계형 컨버터는 안정적 계통 투입, 초기 운전과 반도체 소자의 보호를 위해 적절한 Soft Start-up 전략을 활용하여야 한다. 특히 그리드 포밍 컨버터는 전압원으로 동작하는 특성 때문에 Soft Start-up 전략이 더욱 중요하다는 특징을 가진다. 본 논문에서는 SPC 기반의 그리드 포밍 컨버터 제어 방법을 소개하고, 가상의 가상 동기발전기 개념을 활용한 Soft Start-up 기법을 SPC 기반의 그리드 포밍 컨버터에 대해 구현하였다. 또한 구현된 방법을 HILS 실험을 통해 검증하였다.

이 논문은 2023년도 BK21 FOUR 정보기술 미래인재
교육연구단에 의하여 지원되었음

참고 문헌

- [1] R. Rosso, M. Andresen, S. Engelken and M. Liserre, "Analysis of the Interaction Among Power Converters Through Their Synchronization Mechanism," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 12, pp. 12321–12332, Dec. 2019
- [2] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012
- [3] P. Rodriguez, I. Candela, C. Citro, J. Rocabert and A. Luna, "Control of grid-connected power converters based on a virtual admittance control loop," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1–10
- [4] D. Remon, A. M. Cantarellas, E. Rakhshani, I. Candela and P. Rodriguez, "An active power synchronization control loop for grid-connected converters," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 2014, pp. 1–5
- [5] R. Wilson, "EU connection codes GB implementation-mod 1," Nat. Grid ESO, Warwick, U.K., Final Modification Rep. GC0100, Feb. 2018.
- [6] D. Remon, W. Zhang, A. Luna, I. Candela and P. Rodriguez, "Grid Synchronization of Renewable Generation Systems Using Synchronous Power Controllers," 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, USA, 2017, pp. 169–174